



NASA-TM-77782 19850015495

NASA TECHNICAL MEMORANDUM

NASA TM-77782

N85-23806

QUALIFICATION OF THE T2 WIND TUNNEL IN CRYOGENIC  
OPERATION. B. FLOW FLUCTUATIONS - PARTICLE  
DETECTION AND QUALIFICATION

J. B. Dor, A. Mignosi, M. Plazanet

(NASA-TM-77782) QUALIFICATION OF THE T2  
WIND TUNNEL IN CRYOGENIC OPERATION. B:  
FLOW FLUCTUATIONS, PARTICLE DETECTION AND  
QUALIFICATION (National Aeronautics and  
Space Administration) 84 p HC A05/MF A01

N85-23806

Unclas  
G3/09 21005

Translation of "Qualification de la soufflerie T2 en  
fonctionnement cryogenique. B. Fluctuations de l'ecoulement -  
Detection et qualification de particules." O.N.E.R.A., Centre  
d'Etudes et de Recherches de Toulouse, Toulouse, France,  
Technical Report OA No. 25/5006 AND (DERAT No. 25/5006 DN),  
September 1983, pp. 1-39.

AUG 5 1985

LANGLEY RESEARCH CENTER  
LIBRARY, NASA  
HAMPTON, VIRGINIA

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION  
WASHINGTON, DC 20546 DECEMBER 1984



CORRECTED COPY REC'D 8-5-85

N-155,267

N85-23806-#

## STANDARD TITLE PAGE

1. Report No. NASA TM-77782	2. Government Accession No.	3. Recipient's Catalog No.	
4. Title and Subtitle QUALIFICATION OF THE T2 WIND TUNNEL IN CRYOGENIC OPERATION. B. FLOW FLUCTUATIONS - PARTICLE DETECTION AND QUALIFICATION.		5. Report Date December 1984	
		6. Performing Organization Code	
7. Author(s) J. B. Dor, A. Mignosi, M. Plazanet		8. Performing Organization Report No.	
		10. Work Unit No.	
9. Performing Organization Name and Address The Corporate Word, Inc. 1102 Arrott Bldg. Pittsburgh, PA 15222		11. Contract or Grant No. NASW-4006	
		13. Type of Report and Period Covered Translation	
12. Sponsoring Agency Name and Address National Aeronautics and Space Administration Washington, DC 20546		14. Sponsoring Agency Code	
15. Supplementary Notes Translation of "Qualification de la soufflerie T2 en fonctionnement cryogenique. B. Fluctuations de l'ecoulement - Detection et qualification de particules." O.N.E.R.A., Centre d'Etudes et de Recherches de Toulouse, Toulouse, France, Technical Report OA No. 25/5006 AND (DERAT No. 25/5006 DN), September 1983, pp. 1-39.			
16. Abstract This report presents part of the tests for verification of the T2 transonic induction wind tunnel in cryogenic operation. The first part of the results presented concerns fluctuations in pressure and temperature at ambient temperature and in cryogenic regulation. The second part presents the condensation phenomena which could be observed in the cryogenic flow by means of an optical particle detection system in the test section.			
17. Key Words (Selected by Author(s)) Cryogenic gust wind tunnels - Measurement and analysis of pressure and temperature fluctuations - Condensation phenomena in a cold flow.		18. Distribution Statement Unlimited	
19. Security Classif. (of this report) Unclassified	20. Security Classif. (of this page) Unclassified	21. No. of Pages 84	22. Price

NASA-HQ

2

N-155,267  
N85-238047

## TABLE OF CONTENTS

	<u>Page</u>
INTRODUCTION	5
1 - PRESENTATION OF THE INSTALLATION	6
1.1. General characteristics of the wind tunnel	6
1.2. Control and limitations	10
1.2.1. Wind tunnel control parameters	10
1.2.2. Moving air injection supply and control	11
1.2.3. Liquid nitrogen injection supply and control	12
1.2.4. Evacuated flow control	13
1.2.5. Computerized control and acquisition system	13
1.2.6. Cryogenic gust generation	14
2 - STUDY OF FLUCTUATIONS IN FLOW PRESSURE AND TEMPERATURE	17
2.1. Measurement instrumentation and interpretation	17
2.1.1. Pressure measurements	17
2.1.2. Temperature measurements	19
2.1.3. Measurement acquisition and interpretation	20
2.2. Pressure fluctuations	22
2.2.1. First study at low frequency	22
2.2.2. Determination of fluctuation spectra on a wide frequency band	23
2.3. Temperature fluctuations	24
3 - PARTICLE DETECTION IN THE CRYOGENIC FLOW	27
3.1. Optical particle detection apparatus	27
3.2. Presentation of tests and figures	28
3.3. Results	29
3.3.1. Ice	29
3.3.2. Dry ice	30

3.3.3. Fluid condensation in the working section	31
3.3.4. Additional remarks	33
4 - CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES	37
REFERENCES	39
LIST OF FIGURES	41

QUALIFICATION OF THE T2 WIND TUNNEL IN CRYOGENIC  
OPERATION. B. FLOW FLUCTUATIONS - PARTICLE  
DETECTION AND QUALIFICATION

J. B. Dor, A. Mignosi, M. Plazanet

INTRODUCTION

/7\*

This report and the one entitled "Champ thermique. Etude préliminaire d'une maquette schématique [Thermal Field. Preliminary study of a schematic model]" present the principal results obtained in the T2 transonic induction wind tunnel in cryogenic operation during a series of tests in September and October 1982.

The objective of these tests without a model is to check the installation with respect to generation of a cryogenic gust and also to analyze the qualities of the cold flow. The next phase, planned for 1983, includes the groundwork for generating cryogenic gusts with a precooled model and for obtaining aerodynamic measurements which will validate the cryogenic wind tunnel for testing at a high Reynolds number.

The study of the qualities of the cold flow deals particularly with analysis of thermal gradients in the settling chamber and working section, with qualification of temperature and pressure fluctuations using gauges and spectral distribution, and with definition of the operating range toward low temperatures, using an optical detector to indicate the appearance of particles (ice, dry ice, droplets).

The presentation of the results of this study, split into two reports, is a follow-up to the article presented in "La

---

\*Numbers in the margin indicate pagination in the foreign text.

Recherche Aéronautique" [6] describing the conversion of the cryogenic facility and the first results obtained after that, as well as results presented in the "ETW Cryogenic Technology Review Meeting" [8] concerning the technique of controlling and regulating a cryogenic gust.

The first part of this report includes a general description of ONERA/CERT's T2 wind tunnel at Toulouse. The following two parts each present instrumentation, tests, and results, concerning, respectively, analysis of temperature and pressure fluctuations and optical detection of particles in the cold flow.

## 1 - PRESENTATION OF THE INSTALLATION

/8

More detailed information on operation at room temperature and cryogenic adaptation of the T2 wind tunnel can be found in the notes cited in references [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8].

### 1.1. General characteristics of the wind tunnel

T2 is a pressurized transonic wind tunnel whose system is represented schematically in Figure 1.

A settling chamber with an area of  $1.8 \times 1.8 \text{ m}^2$  equipped with an anti-dust filter, a honeycomb, and anti-turbulent wire nets, precedes an entrance cone with a contraction ratio of 20.

The working section, nearly square and  $0.39 \times 0.37 \text{ m}^2$  in area, includes a second throat downstream to stabilize the flow at Mach numbers higher than 0.6.

A system where several diffusers return the flow to low velocity closes the tunnel.

T2 is an induction wind tunnel, which means that it has a high-velocity inductive air jet. Moving air is injected by the trailing edges of seven blades at the first elbow after the working section. Each blade is internally equipped with four small blast pipes, separately fed by high pressure air, which permits varying the injection area. At their trailing edges, the blades deliver jets at  $M = 1.6$ . The downstream part of the injector elbow consists of one mixing chamber between the directed flow and the seven almost two-dimensional streams.

In cryogenic operation, the flow is cooled by direct injection of liquid nitrogen into the system. Cooling of the moving air could have been planned, but the approach chosen, which was easier to use, was obvious because of increased effects of a mistake when the temperature of the moving stream becomes higher than that of the directed flow. On the other hand, among studies produced by the cryogenic adaptation of the wind tunnel, studies done by the T2 pilot installation have shown that a noticeable improvement of the qualities of the cold flow was obtained by placing the liquid nitrogen injection as far as possible upstream of the working section. Nitrogen /9 is therefore injected peripherally, normally into the flow, at the wall from a unit located just downstream of the mixing chamber for moving air and directed fluid.

The necessary evacuation of a flow equal to the moving flow, or, in cryogenic mode, equal to the sum of the moving air and cooling nitrogen flows, occurs just upstream of the injector elbow. This evacuation takes place, because of wind tunnel pressurization, through the porous bronze walls of a rectangular channel, which acts as a first aerodynamic diffuser between the working section and the injector elbow.

The wind tunnel functions by gusts whose duration, about one minute, depends to a certain extent on the moving



flow necessary for the test and on the available high pressure air reserve. On the other hand, the system, which can be pressurized up to 5 bars, is made of ordinary steel (a metal which becomes fragile at low temperatures). These factors led to the adoption of internal thermal insulation, relatively thin, which makes cryogenic gusts possible. The reduction of heat exchanges at the wall is sufficient to practically obtain rapid cooling of the flow only and negligible temperature variation in the metal lining for gusts lasting about 100 seconds. The surface temperature of the insulation changes as rapidly as that of the flow and stabilizes at a level similar to the adiabatic wall temperature.

According to this view, the best insulations are those in which conductivity and thermal capacity are low. However, other important problems are posed: The type of insulation surface and the holding and adhesive ability of the material.

Schematically, the internal insulation of the wind tunnel is as follows:

In the low velocity parts, the system and settling chamber, 10 mm of polyurethane locally strengthened by Kevlar fabric. This is an insulation with very low thermal conductivity and capacity, but whose surface is slightly rough.

In the high velocity parts, the working section and /10 injector elbow, 5 mm of Norcoat agglomerated cork. This is less insulating, but has an acceptable surface.

Certain parts of the system, the injector blades and liquid nitrogen injection unit, have been given special insulation detailed in reference 11.

Given a double objective of measurement and safety, the wind tunnel system is permanently equipped with a hundred thermocouples, which make it possible to know:

- the temperature of the internal wall,
- the temperature of the metallic structure,
- the temperature of the flow in the settling chamber, using a grid of 25 thermocouples.

The measurement from the central thermocouple of this grid is the generating reference temperature noted as  $T_i$  in the figures and used for regulation.

The utilization range of the T2 wind tunnel covers Mach numbers from the low subsonic ( $M = 0.3$ ) to the transonic ( $M = 1$ ). Generating pressure can vary from 1.5 bars absolute to a maximum 5 bars.

By anticipating the conclusions of this report, it can be said that the operating temperature range limit seems to be located at about 95 K and that a gust at the generating temperature of 100 K can be generated without particular difficulty.

The tests reported here cover the entire temperature range and were conducted at the generating pressure of 2 bars absolute and at Mach numbers in the working section of 0.6 or 0.8.

Finally, the working section of T2 is equipped with self-moving walls which allow for relatively large two-dimensional models. It seems that walls similar to those used at room temperature, made of thin metallic plate reinforced by stretched wire, can be used in cryogenic operation, the caloric mass of the plate being low enough that

/11

the flow cools rapidly. Such walls, made of Invar, were manufactured and tested, and their use is planned for the next phase of cryogenic tests with a model.

The Reynolds number given in figure 4 as a function of the Mach number and of the pressure at room temperature and at 120 K, is formed with a 15 cm length, which is, due to the movable walls, a current value for the chord of airfoils studied in the T2 wind tunnel.

We also point out that a precooling attachment for two-dimensional models was made and tested [13]. Before the cryogenic gust, the profile is contained in a precooling box placed next to the working section, in which it is cooled by a gaseous cold current at low velocity. An activator and a guidance and locking system permit introduction of the airfoil into the working section once the flow, first generated at a low Mach number, has attained cryogenic testing temperature.

## 1.2. Control and limitations

This paragraph will describe the attached equipment and the control elements in the wind tunnel, as well as the process of generating a cryogenic gust.

### 1.2.1. Wind tunnel control parameters

A synthetic diagram summarizing the different control elements of the wind tunnel is given in figure 3.

The three operating parameters are the Mach number in the working section, the generating pressure, and the generating temperature.

The Mach number is defined by the area of the second throat of the working section, when there is sufficient moving air flow for it to be initiated. We point out that /12 this throat is motorized and that its area can be varied during the test. However, during our tests, where the Mach number in the working section was always 0.6 or 0.8, the throat was positioned at the corresponding area before the test.

For control of pressure, temperature, and eventually Mach number, the three following parameters were used:

- moving air flow
- liquid nitrogen flow
- evacuation flow

#### 1.2.2. Moving air injection supply and control

At a pressure of 80 bars, a compressor feeds a 45 m<sup>3</sup> tank which holds compressed air to be used for injection. This tank is connected by a pressure-reducer to a water heater, where the pressure is about 20 bars: this makes it possible to compensate for the decreasing injected air and to keep it near room temperature.

The wind tunnel is fed by a proportional control valve, which regulates the pressure in the injector blade settling chamber, noted as P<sub>ij</sub>. Thus, the moving air is controlled by static pressure or by stream density at M = 1.6.

The multiple valve system, which distributes the flow to the various nozzles of the trailing edge, is located just upstream of the blades. During the tests described in this report, all nozzles are used.

We also point out that before leaving the storage tank, the compressed air passes through a dryer with aluminum balls, which lowers its dewpoint to  $-80^{\circ}\text{C}$  in optimal operation (paragraph 3.3.1.).

#### 1.2.3. Liquid nitrogen injection supply and control

Figure 3 is a diagram of the liquid nitrogen supply system. A  $20\text{ m}^3$  storage tank feeds a  $2\text{ m}^3$  test tank, which can be pressurized up to 18 bars, which is connected to wind tunnel injectors.

During our tests, the gas used to pressurize /13 the reservoir was dry air, drawn from the  $45\text{ m}^3$  tank which feeds the injector blades. The system was then connected to an evaporator supplying high-pressure nitrogen gas, which can be stored in the  $45\text{ m}^3$  tank; this makes it possible for the wind tunnel to operate with pure nitrogen.

Liquid nitrogen is injected periphally along two circles, on each of which are distributed 16 separately fed spray nozzles. Each injector can be fed or not fed by its own electric valve. The nozzle diameters are graduated in size so that it is possible to vary mass flow, which can reach  $24\text{ kg/s}$ , with resolution to the thousandth. As injection pressure is adjusted, this apparatus permits effective digital control of the nitrogen liquid flow.

Upstream of the group of electric valves, the system also includes a safety valve and a low-flow bypass, which makes it possible to cool the injection system up to the electric valves with purges, before the test itself.

#### 1.2.4. Evacuated flow control

The flow which is evacuated between the working section and the injector elbow and expelled into the atmosphere is separated into two parts which use, respectively:

- a principal line with a continuous analogous valve, which is positioned before the test,
- an auxiliary line divided into seven parallel branches with graduated areas, each supplied with an electric valve, which allows this part of the flow to be numerically regulated at 127 levels.

#### 1.2.5. Computerized control and acquisition system

The wind tunnel has a system for data control and acquisition composed of two HP 21 MX mini-computers which /14 are connected, but each handles certain well-defined tasks. Both are capable of executing programs in real time. This computer system is described in more detail in reference [8].

The first computer takes and interprets measurements. A 16-line multiplex system, operating at high voltage ( $\pm 10$  V), permits measurement up to 16 kHz when data are stored on magnetic tape. A 100-line scanner, operating at low voltage, whose data acquisition frequency can reach 200 Hz, permits permanent temperature measurement (walls, metal lining, wire netting and fixed rake), through one of the multiplex lines.

This computer is reserved for implementing and compiling programs. It also controls the movable walls and the instrumentation systems, such as the scanivalves and the probes.

The second computer controls the wind tunnel. It executes programs developed and compiled on the first computer. It has its own acquisition system which is composed of a 16-line multiplexer with an acquisition frequency of 45 kHz. One terminal is reserved for starting the test and for routing operating data and messages during it. The computer has the operating parameters measured on the wind tunnel permanently in storage and directs injection of moving air and liquid nitrogen, evacuation, the second throat, and, for future tests with a model, introduction of the airfoil.

During the test, a manual interruptor permits stopping the control program and proceeding to the gust-stopping phase.

For safety, an independent electronic apparatus installed on the link with the liquid nitrogen injection and evacuation valves checks computer frequency instructions. This frequency should be 10 Hz; the apparatus closes the nitrogen injection valves and opens the evacuation valves when a noticeable variation is detected. During the test, the computer controls the measurements 10 times per second and moves to the gust-stopping phase if an anomaly occurs.

#### 1.2.6. Cryogenic gust generation

/15

We have chosen a gust at very low temperature, doing part of the tests with optical particle detection (Figure 30), done at a Mach number in the stream of 0.83 and at a generating pressure of 2 bars, to illustrate the procedure of a cryogenic test. The nominal testing temperature  $T_i = 95 \text{ K}$  seems, however, to be near the limit of the wind tunnel's operating range (3.3.3).

Reference [8] concerns the control and regulation method which makes it possible to generate a cryogenic gust. We repeat merely that the general principle of the method is to treat each phase of the test as a particular regulation problem, which permits using simplified models of the wind tunnel and, in particular, separating pressure and Mach number control from temperature control.

Figure 5 shows the changes in control and operation parameters during the test.

The preliminary phase of every cryogenic gust consists of starting the wind tunnel at room temperature, at low generating pressure, and at a very low Mach number. The injected moving air flow is sufficient to obtain a Mach number in the stream of 0.27. The unstated throat is already in the position corresponding to the nominal Mach number of the test. On the evacuation circuit, the regulating valves are all open, and the continuous valve is in a position compatible with nominal Mach and pressure values. In our case, this phase lasts about 5 seconds and the generating pressure stabilizes at 1.1 bars.

The first phase of the cryogenic gust consists of cooling and stabilizing this flow to the nominal temperature of the test at a low Mach number. Air injection and evacuation valves stay in position. The computer orders the injection of a liquid nitrogen flow equal to twice that necessary to cool the moving air flow ( $Q_{LN2} = 3 \text{ kg/s}$  in our case), and then brings it back to the proper amount via a double slope when /16 it sees that enough has been injected to bring the flow to the desired temperature. After this operation, which in our case lasts 20 seconds, the generating temperature is very near the desired level, and the computer begins closed loop temperature regulation, identical to that which will be used during the



third phase, which permits finer adjustment. This phase finishes when the stabilization at nominal temperature is judged to be sufficient. At this moment, in future tests, the computer will issue the order to introduce the precooled model. In our case, the total duration of the first phase is 26 seconds, of which 6 seconds are devoted to final regulation.

The second phase consists of simultaneously increasing the Mach number and generating pressure to nominal values, while maintaining relatively constant flow temperature. During all of this phase, while the Mach number and pressure are varied by action on the moving and evacuated flows, temperature maintenance is independently ensured by a liquid nitrogen flow calculated to cool the moving air flow and to compensate for the effect of compression.

At the beginning of this phase, the regulation valves close on the evacuation circuit and the moving flow increases up to a value that will be maintained during the rest of the test and which is sufficient to start the throat and reach the desired pressure of 2 bars, allowing for the chosen position of the continuous evacuation valve. The generating pressure increases rapidly; when it reaches 2 bars, it begins to be regulated by the evacuated flow. This phase ends when stabilization is obtained. In our case, it lasts about 30 to 35 seconds. Also during this phase, the flow temperature undergoes rather significant variations of several degrees either side of  $T_i = 95 \text{ K}$ .

During the third phase, the operating parameters of the wind tunnel are maintained at the nominal values of the test, for as long as is necessary for aerodynamic measurements. In the case of our testing, these consisted of temperature readings in the stream and measurements of /17 temperature and pressure fluctuations. During this phase,

simultaneously, the pressure is regulated by the evacuated flow, and the temperature, which is retaken from the final part of the preceding phase, is regulated in closed loop. It will be seen that, during this phase, which lasts about 20 seconds, the generating temperature is remarkably stable and stays in a band 1 K wide. The liquid nitrogen flow is about 11 kg/s.

The gust is stopped by stopping the liquid nitrogen injection and opening the evacuation, before reducing the moving flow.

## 2 - STUDY OF FLUCTUATIONS IN FLOW PRESSURE AND TEMPERATURE

Temperature and pressure fluctuations were analyzed during the final stabilized phase of the gust as a function of test temperature at a Mach number in the stream of  $M = 0.83$ , and as a function of the generating pressure of  $P_i = 2$  bars constant, the downstream throat being started. Temperature levels  $T_i = T_{\text{Ambient}}$ ,  $T_i = 150$  K, and  $T_i = 120$  K were in particular studied.

### 2.1. Measurement instrumentation and interpretation

#### 2.1.1. Pressure measurements

Static pressure fluctuations in the stream are measured by two miniature Kulite transducers mounted at the wall near the center of one lateral door of the stream. Two devices, noted as K1 and K2, were used (figure 6).

The KI apparatus tries to minimize the gap between the static pressure gauge and the transducer membrane to obtain a strong, active band, which reaches a frequency of about 10 kHz. A rubber toric joint ensures the tightness of

the volume of measure and also serves, with a teflon ring located in the back, to hold the transducer in position while protecting it from strong mechanical stresses. Pressure vent diameter is 0.4 mm, and the entire apparatus, made of metal, makes up a tube 10 mm in diameter set in the metallic wall. /18 No particular precaution to avoid the cooling of the transducer in cryogenic operation intervenes a priori in the design of this apparatus, but it can be noticed that there is no direct contact between the transducer and the metal of the apparatus.

The K2 apparatus also includes a very reduced space between the pressure gauge of diameter 0.7 mm and the transducer, but its principal peculiarity is a 20-mm-diameter copper tube in which the transducer is directly set on a large portion of its length and which constitutes a thermal flywheel used to reduce temperature variation, at the time of cryogenic use. The tube is thermally insulated from the flow and the metallic wall: it is contained in a plexiglass porthole and a cylindrical plexiglass patch carrying the pressure gauge completes the apparatus between the transducer and the flow.

Unfortunately, it was established that, in cryogenic use, thermal stresses caused a mark on the wall at the junction between the porthole and the patch. Some strips of thin adhesive tape, stuck parallel to the flow on either side of the pressure gauge, greatly reduced measurement errors from this phenomenon (overestimation of pressure fluctuation).

Nevertheless, the results obtained with the K2 apparatus are given only for data, always in comparison with that provided by the K1 apparatus, which are the basis for the conclusions of this study.

We repeat that a Kulite transducer preserves a linear response as a function of pressure when its own

temperature varies. Its sensitivity and its reading at zero pressure vary slightly with the temperature. There is also a relationship between the membrane temperature and electrical resistance of the gauge bridge. Such a transducer is thus usable even when its temperature varies, by simultaneously measuring its reading and the resistance of the gauge bridge and doing a complete gauging as a function of pressure and temperature. The gauging of the transducer used in the K1 /19 apparatus can be found in figure 7.

Figure 8 shows examples of transducer temperature changes, measured using the bridge impedance, in the case of the K1 apparatus, during tests at  $M = 0.8$  and at generating temperatures of 200 K, 150 K and 100 K. We point out that the most significant temperature decrease, for the tests at  $T_i = 100$  K, does not go beyond about 50 degrees and that the corresponding variation in measuring ability is 4.3%. We have therefore not lost the measuring ability of the transducer at room temperature for the study of pressure fluctuations.

#### 2.1.2. Temperature measurements

Stagnation temperature fluctuations are measured by the resistance of a "cold wire" placed orthogonally in the flow at the center of the settling chamber, just downstream of the collector. The thermal inertia of the tungsten wire with a diameter of  $9\mu$  is low enough that its temperature follows that of the flow to a frequency on the order of 50 Hz. The wire is supplied by a constant low intensity current of  $I = 3$  mA. A calibration done on the flow shows that its resistance, measured by the tension at its boundaries, varies linearly as a function of temperature.

We have also analyzed, from the point of view of thermal turbulence, the measurements obtained with three

temperature sensors, described in detail in the associated report [10], whose sensing unit is an RdF copper-constantan thermocouple plate. Figure 15 shows a diagram of these sensors.

The  $T_i$  sensor is the central part of the grid of 25 thermocouples placed at the exit of the settling chamber. It measures the generating temperature with reference to the flow. The thermocouple plate, on a hardwood support, is placed parallel to the flow.

The  $T_{isr}$  sensor is the central tooth of the  $\angle 20$  probing rake in the working section. Similar to the preceding, it measures a friction temperature which is linked, because of the high velocity, to the generating temperature by a recovery factor.

The  $T_{isa}$  sensor is the one for stoppage temperature placed in the working section. The thermocouple plate parallel to the flow is continued in a wooden hollow body used for isentropically stopping the flow.

### 2.1.3. Measurement acquisition and interpretation

The signal measured during the final phase of test is numbered at N points per second by the acquisition chain after an analogous filtering which eliminates frequencies higher than  $N/2$ . The fluctuations are studied by frequency series. For a given test case, we made two or three measurements successively:

- filtering at 40 Hz, numbering at 100 pts/s,
- filtering at 400 Hz, numbering at 1000 pts/s
- filtering at 4000 Hz, numbering at 10,000 pts/s (only in the case of pressure fluctuations at ambient temperature).

A Fourier transformation program allows calculation of the average energy spectrum of the signal. The sizes are made non-dimensional using the reduced frequency  $n = \frac{f H}{U}$  (H section height; U flow velocity) and reduced fluctuation energy  $F(n)$  so that:

$$\int_0^{n \max} F(n) dn = \frac{\overline{p'^2}}{q^2} \text{ where } q = \frac{1}{2} \rho U^2 \text{ for pressure, and}$$

$$\int_0^{n \max} F_T(n) dn = \frac{\overline{T_i'^2}}{T_i^2} \text{ for temperature.}$$

The spectra described constitute the average of several spectra obtained at different time intervals. Because of the brevity of the stabilized phase and the low amplitude /21 pressure and temperature changes due to the low frequency regulation, fewer time intervals can be exploited for spectrum calculation at low temperature. This explains the fact that the spectra presented for cryogenic tests sometimes are not as "smooth" as those obtained at room temperature (figure 12).

These methods, whose principal elements have just been covered, were developed to check the T2 wind tunnel at ambient temperature within the framework of the Lehart project [2]. We have reused them with cryogenic flows.

During cryogenic tests which are not specially used for studying fluctuations, we use, on each measurement line, a numbered measurement at 43.5 points/second, each point being the average of 23 points measured every millisecond. To complete low-frequency results, the spectrum calculation program is also applied to certain temperature and pressure measurements acquired in this manner.

Finally, to facilitate reading of the results, here is, at ambient temperature and at T = 120 K, a table

showing the correspondence between frequency  $F$  and reduced frequency  $n$ .

$T = 290 \text{ K}$

$n$	$F \text{ (Hz)}$
$10^{-3}$	0,8
$10^{-2}$	8
$10^{-1}$	76
1	764
10	7640

$$U = M \times \sqrt{\gamma R T}$$

$$M = 0,83$$

$$H = 0,37 \text{ m}$$

$T = 120 \text{ K}$

$n$	$F \text{ (Hz)}$
$10^{-3}$	0,15
$10^{-2}$	5
$10^{-1}$	49
1	491
10	4915

$T_i =$	290	250	200	150	120	100 (K)
$F (n = 10^{-1}) =$	76	71	63	55	49	45 (Hz)

## 2.2. Pressure fluctuations

/22

### 2.2.1. First study at low frequency

Figures 9 and 10 give, as a function of time, the signal of the static pressure in the section, measured by transducers K1 and K2 and numbered at 43.5 points/second, for test temperatures ( $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars) rising by gradients above ambient temperature at  $T_i = 100 \text{ K}$ .

The measurement made by K1 shows an increase in fluctuation amplitude, which only becomes noticeable at a relatively low temperature:  $T_i = 150 \text{ K}$ ,  $120 \text{ K}$ ,  $100 \text{ K}$ .

K2 shows a similar change, but with exaggerated amplitudes at  $T_i = 200 \text{ K}$ ,  $150 \text{ K}$ ,  $120 \text{ K}$  and a significant

reduction, not likely, at  $T_i = 100$  K.

Spectral analysis of these measurements, for transducer K1, leads to the low-frequency spectra shown in figure 13. The median values of  $\sqrt{nF(n)}$  brought back up to the level of reduced frequency  $n = 10^{-2}$  are reported as a function of test temperature in figure 14. By directly observing the signal, we see again the established tendency: fluctuation energy changes little from ambient temperature at  $T_i = 200$  K ( $\sqrt{nF(n)} \cong 0.3 \cdot 10^{-3}$ ) and increases at lower temperatures with an apparent maximum at  $T_i = 120$  K ( $\sqrt{nF(n)} \cong 0.5 \cdot 10^{-3}$ ) and a slight reduction for  $T_i = 100$  K. For information, compare the spectra obtained by the K1 and K2 devices at  $T_i = 150$  K in figure 11.

#### 2.2.2. Determination of fluctuation spectra on a wide frequency band

The results of the tests intended for the study of pressure fluctuations with the K1 transducer ( $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars) are presented in figure 12.

At ambient temperature, three successive acquisitions have allowed the analysis of the phenomena at frequency ranges  $F < 40$  Hz,  $F < 400$  Hz, and  $F < 4000$  Hz. /23  
The spectrum determined shows an extremely low level at low frequencies ( $\sqrt{nF(n)} \cong 0.3 \cdot 10^{-3}$  for  $n < 10^{-1}$ ) and a progressive increase in the fluctuation level for  $n > 10^{-1}$  corresponding to the turbulent boundary layer noise of the wall.

This spectrum is very near that measured before the system was transformed for cryogenic operation and corresponds to the strict requirements of the LEHRT project.



At  $T_i = 120$  K, the fluctuations were measured in the frequency ranges  $F < 40$  Hz and  $f < 400$  Hz. At  $T_i = 150$  K begins the  $F < 40$  Hz range. The spectra determined are identical in form to the ambient temperature spectrum, with an increase in fluctuation level for all the frequencies analyzed. The average levels of the amplitude  $\sqrt{nF(n)}$  raised again to  $n = 10^{-2}$ , go from  $0.3 \cdot 10^{-3}$  at T Room to  $0.4 \cdot 10^{-3}$  at  $T_i = 150$  K and  $0.5 \cdot 10^{-3}$  at  $T_i = 120$  K. This fluctuation change as a function of temperature is coherent with the curve already obtained at a low frequency (figure 14).

It is probable that this phenomenon is related to cryogenic operation, in correlation with the thermal turbulence of the flow which increases when the test temperature diminishes, as we are going to show.

### 2.3. Temperature fluctuations

Given in plate 16 as a function of time is the signal of the temperature in the chamber, measured by the cold wire and numbered at 43.5 points/second at test temperatures  $T_i =$  T Room,  $T_i = 150$  K and  $T_i = 120$  K (tests at  $M = 0.8$  and  $P_i = 2$  bars). These signals, simultaneously measured by the  $T_{isa}$  and  $T_{isr}$  thermocouple sensors in the section and  $T_i$  in the chamber, are also shown in this figure.

At ambient temperature, thermal turbulence is very low. The cold wire signal fluctuates very little, although the curve appears broken up due to the numeric resolution of the acquisition system. At the levels of  $T_i = 150$  K and  $T_i = 120$  K, the cold wire shows a very clear thermal turbulence.

The average crest-to-crest amplitude of the fluctuation ranges from about 0.1 K at ambient temperature to /24

about 0.5 K at  $T_i = 150$  K and  $T_i = 120$  K. Also, the temperature curve can include periodic irregularities, due to instantaneous regulatory modifications of the liquid nitrogen flow made every three seconds, which are sometimes significant.

The thermocouple sensors confirm the existence of these fluctuations, but it appears clear that lowest response time belongs to the cold wire, whose signal includes frequencies of about 10 Hz to 20 Hz, whereas the sensor signals carry low frequencies up to several Hertz.

The essential results of the temperature fluctuation spectral analysis measured by the cold wire are shown in figure 20.

At operating temperatures  $T_i = 295$  K and  $T_i = 120$  K, we successively analyze the frequency ranges  $F < 40$  Hz and  $F < 400$  Hz. At the level of  $T_i = 150$  K, we are limited to the  $F < 40$  Hz band.

Fluctuation level is correctly measured for low frequencies up to a value of about 50 Hz ( $\sim 10^{-1}$ ). Beyond this appears attenuation due to the thermal inertia of the  $9\mu$  wire, especially visible in acquisition at 1000 points/second ( $F < 400$  Hz) for  $T_i = 120$  K. The 40 Hz cut-off frequency of the analogous filter also appears in acquisitions at 100 points/second.

The spectra obtained show in reduced form an apparently constant level up to  $N = 10^{-1}$ , which increases when test temperature diminishes.

To better define this increase, spectra were also determined from other cold wire measurements similarly filtered at 40 Hz, but numbered at 43.5 points/second, available for a

greater number of cryogenic tests. These spectra include also an apparently constant level up to a frequency of about 20 Hz, and are shown in figure 21 for operating temperatures of 250 K, 200 K, 150 K and 100 K. The average quadratic fluctuation values obtained were represented as a function of test temperature in absolute ( $\sqrt{T'_\lambda{}^2}$ ) and relative ( $\frac{\sqrt{T'_\lambda{}^2}}{T_\lambda}$ ) value in figure 23. /25

We establish a significant increase of  $\frac{\sqrt{T'_\lambda{}^2}}{T_\lambda}$ , which goes from  $1.5 \cdot 10^{-4}$  at ambient temperature to  $1.4 \cdot 10^{-3}$  at  $T_i = 100$  K. This value is of course related to the temperature reduction, but also to the increase in average fluctuation level  $\sqrt{T'_\lambda{}^2}$  which goes from 0.03 K at ambient temperature to about 0.14 K for temperatures lower than 120 K.

We can attribute the physical origin of these fluctuations, evidently related to cryogenic operation, to:

- an imperfect mixture of the moving air at ambient temperature with the directed cold flow,
- a lack of cooling homogeneity by liquid nitrogen pulverization,
- temperature regulation for variations at very low frequency.

The spectra obtained with thermocouple sensors are also presented as reference, always compared to those obtained with the cold wire during the same tests and with the same acquisition conditions, disregarding the absence of similar filters for the sensors (figures 17, 18, 19 and 22). The cut-off frequencies, seemingly related to the sensor thermal inertia, seem to be about 3 Hz to 5 Hz.

### 3 - PARTICLE DETECTION IN THE CRYOGENIC FLOW

The objective of this study is to qualitatively detect the presence of particles (ice, dry ice, droplets of liquid nitrogen, gas condensation from the flow) in the wind tunnel section during cryogenic operation and to specify temperature and pressure conditions of their appearance.

#### 3.1. Optical particle detection apparatus

/26

The detection method is based on the increase of diffused light from a laser when it is crossed by the particles. The apparatus is described in figure 24.

The lateral doors of the section are equipped with two glass portholes, having external defrosting systems, which face each other. In crossing the section, a low-power laser beam cuts the optical field of a light amplifier placed at the opposite side. The laser and light amplifier axes are sloped with respect to the flow to eliminate any reflection of the beam on the portholes, while keeping the part of the beam crossing the section visible. The laser beam stops on a lateral part of the opposite porthole which is painted in black matte. All tests are done with the same geometric adjustment of this apparatus.

An additional indication of the presence of particles is obtained by measuring, during a test, the change in charge loss of the anti-dust filter, which is located at the settling chamber entrance, and can retain particles and be partially filled with them.

A television camera allows us to visually confirm the changes in the light amplifier signal: severe increase and progressive decrease of the ray's luminosity and in particular,

at very low temperature, masking of the laser beam by particle fog leading to the cancellation of the light amplifier signal.

### 3.2. Presentation of tests and figures

The tests systematically cover all operating temperatures up to the level  $T_i = 95$  K, at a Mach number in the section of 0.8 and at a constant generating pressure of  $P_i = 2$  bars.

Figures 25 and 30 show the change in flow generating temperature, light amplifier indication, and filter charge loss during gusts at temperatures  $T_i = 250$  K, 200 K, 150 K, 120 K, 100 K, and 95 K. We indicate that the rapid increase in filter charge loss, which occurs once the flow has reached its /27 required temperature and lasts about 15 seconds, corresponds to the increase phase of the Mach number in the working section and of the generating pressure.

Figures 32 and 35 give, for the same tests, the light amplifier indication as a function of the instantaneous generating temperature.

The solid-vapor balance curve for carbon dioxide  $\text{CO}_2$  in the diagram (P,T) for low pressures is shown in figure 36.

The liquid-vapor balance curves for oxygen and nitrogen, as well as the air moisture and mixture curves (11%  $\text{O}_2$ ; 89%  $\text{N}_2$ ) toward which the wind tunnel fluid moves at the end of the gust, are given in the diagram (P,T) in figure 37.

In the case of condensation in the working section, due to local static pressure and temperature conditions, these curves can be expressed in the drawing ( $P_i$ ,  $T_i$ ) of the flow

generating conditions where they are parametered by the Mach number in the section.

For nitrogen and for the mix (11%  $O_2$ ; 89%  $N_2$ ), these curves can be found respectively in figures 38 and 39.

### 3.3. Results

/28

The gust at  $T_i = 95$  K (Figure 30), which is the coldest of this test series, is a good illustration of the range of results obtained.

The light amplifier signal shows the successive appearance of three very distinct chains of particles when the test temperature decreases (Figures 25 to 30).

The first two passages systematically begin at a given temperature level, and the appearance of a large number of particles is followed by a progressive reduction of their number. We attribute them to condensation of water vapor and carbonic gas.

The last passage is the most dense, and it appears only at a very low temperature (Figures 30 and 31). We will identify it with the condensation with no delay phenomena of flow fluid in the working section.

#### 3.3.1. Ice

Ice appears at the beginning of the low-pressure flow-cooling phase, at a generating temperature between 240 K and 250 K. This relatively high value shows the deficiency of the present dryer, which we can admit does set the humidity level of the gas present in the system, given that, for these tests, it is systematically closed when the flow is stopped.

In effect, the performance of the dryer, which in optimum operation reaches a dew point of  $-80^{\circ}\text{C}$  at normal atmospheric pressure, considerably decreases in frequent usage which does not permit sufficient regeneration of the aluminum balls of each cartridge when it is not in service. During this test series, a dew point of about  $-30^{\circ}\text{C}$  is entirely plausible.

Many ice particles appear. They are detected /29 during a period of about 15 s, during which their quantity rapidly decreases (Figure 27). This phenomenon can be explained by the rapid crystallization of water vapor contained in the system and the progressive retention of the majority of the crystals by the anti-dust filter placed at the chamber entrance, which causes the light amplifier signal to diminish. Finally, a balance condition is established between the quantity of water vapor injected with the moving air, which constantly produces crystals, and the retention produced by the filter. The regular increase of the filter charge loss, measured during the final phase at a high Mach number, confirms this phenomenon. During tests at  $T_i = 200\text{ K}$  and  $T_i = 150\text{ K}$  (figures 26 and 27), for which only the appearance of the ice is shown, we register a slope of about  $0.07\text{ mbar/s}$ .

### 3.3.2. Dry ice

Dry ice condenses at a generating temperature of about  $T_i = 135\text{ K}$ . In our tests ( $T_i = 120\text{ K}$ ,  $100\text{ K}$ , and  $95\text{ K}$ ), this condensation takes place during the low-pressure flow cooling phase. The observed temperature level is compatible with the solid-vapor equilibrium curve (Figure 36) and the average concentration of carbon dioxide in the air (0.03% to 0.06% in volume), which gives a condensation temperature between  $129\text{ K}$  and  $134\text{ K}$  for a pressure of  $1.1\text{ bar}$  absolute.

The phenomenon is similar to that observed with ice: rapid condensation of the carbonic gas contained in the system and progressive disappearance of most of the particles retained by the filter (Figures 28, 29 and 30). During the final phase of the same tests at  $M = 0.83$ , a regular growth of the filter charge loss is found which goes from 0.13 to 0.21 mbar/s, seemingly due in large part to the condensation and retention of the permanent supply of water vapor and carbonic gas from the moving flow.

### 3.3.3. Fluid condensation in the working section /30

A very important passage of particles at low generating temperature shows up fleetingly during the test at  $T_i = 95$  K, due to a momentary decrease in the generating temperature (Figures 30 and 31). The phenomenon is produced at the beginning of the stabilized phase at  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars, when closed-loop temperature regulation resumes [8 and 10]. Figure 31 again shows, on a larger scale, the change in liquid nitrogen flow, generating temperature, and light amplifier signal during this part of the gust.

The correlation between the severe reduction in liquid nitrogen flow, at the time as resumption of regulation by degrees, and the rise in generating temperature, appears clearly and shows a delay time of about a second.

Since the reference source at  $0^\circ\text{C}$  used for continuous acquisition of  $T_i$  is not very stable, we corrected the measurement by a half-degree with reference to the one made with the same thermocouple through the scanner, which has its own, more reliable reference source at ambient temperature.

The light amplifier signal increases severely when the generating temperature becomes less than between 92 K



and 93 K, and returns to where it was before the phenomenon, when it again becomes higher than this threshold about seven seconds later.

Direct camera observation allows us to verify the importance and limited duration of the phenomenon and to verify that the cancellation of the light amplifier signal is due to a very intense fog which masks the laser beam.

When the particles appear and disappear, static temperature and pressure conditions in the working section are  $P_S = 1.27$  bars and  $T_S = 81.3$  K ( $T_i = 92.5$  K;  $P_i = 2$  bars;  $M = 0.83$ ).

These values lead to attributing the phenomenon to condensation in the working section and without delay, to 31 the mixture (11%  $O_2$ ; 89%  $N_2$ ) which makes up the fluid of the flow at the end of the gust. This composition results from the mixture of the moving air and cooling nitrogen flows, which for our test are similar. The point obtained is placed on the moisture curve for this gaseous mixture (Figure 37).

We point out that two other low temperature tests allowed reproduction of this phenomenon. The condensation threshold ( $T_i \approx 93$  K) is the same, and the fog is maintained so that the generating temperature stays below this value.

When the identification of this phenomenon is correct, the local pressure and temperature conditions of its appearance are known, and we can translate them as a function of the flow parameters  $P_i$ ,  $T_i$  and  $M_{section}$  (Figure 39).

This constitutes a first estimation, section empty, of the operating limits of the T2 wind tunnel for low temperatures. This limit increases as the generating pressure

and Mach number increase. However, at a generating pressure of  $P_i = 3$  bars and for Mach numbers lower than  $M = 1$ , it does not exceed  $T_i = 100$  K.

#### 3.3.4. Additional remarks

##### - Determination of condensation temperatures

The instantaneous generating temperature measured in the settling chamber is a parameter for these condensation phenomena only in the stabilized phase, which is especially the case at the time of the appearance for  $T_i < 93$  K of fluid condensation in the section. During flow cooling in the section upstream of the chamber temperatures are more than 10 degrees below the chamber temperature. Thus, during the tests at  $T_i = 95$  K and  $T_i = 100$  K, generating temperatures at the appearance of the ice and dry ice are respectively 275 K and 150 K. Tests at systematically distributed temperatures allow better definition of the condensation conditions and lead to /32 the previously given values. We particularly verify that, at  $T_i = 250$  K, the light amplifier does not show any particles in the section and the filter charge loss remains constant. At  $T_i = 200$  K and  $T_i = 150$  K, only ice is detected. Several tests at  $T_i = 120$  K and  $T_i = 100$  K show successive appearance and disappearance of ice and dry ice, but no other significant particle passage is detected at low temperature. The condensation temperature for  $\text{CO}_2$  is taken from the test at  $T_i = 120$  K, during which the particles appear at instantaneous generating temperature 135 K, relatively near the set value.

##### - The matter of non-vaporized liquid nitrogen droplets

When the T2 cryogenic adaptation was prepared, a preliminary study was done at the T'2 pilot wind tunnel with a

similar laser/light amplifier apparatus to detect the eventual presence of non-vaporized liquid nitrogen droplets in the section during cryogenic tests at a generating pressure of about 1.8 bars absolute, and at  $M = 0.8$  [12].

As with the T2 wind tunnel, the peripheral liquid nitrogen injector was placed immediately downstream of the moving air injection, but the settling chamber did not include an anti-dust filter. The light amplifier had an adjustable threshold, permitting it to count only particles larger than a certain size.

The significant results of this study are:

- the systematic appearance of a significant number of relatively small particles when the generating temperature becomes lower than 137 K, which hardly decreases at all during the gust,
- the progressive appearance, starting at a lower temperature about  $T_i = 115$  K, of a smaller number of relatively large particles.

The comparison with the present results /33 obtained at T2 allows confirmation of the fact that the particles detected below the  $T_i = 137$  K level were of dry ice, and that it is probable that the larger particles, shown at low temperature, were mostly liquid nitrogen droplets.

It should thus be emphasized that during present tests at T2, no significant passage of non-vaporized liquid nitrogen droplets has been shown. The possibility has not been ruled out that the constant passage of relatively insignificant particles, detected at low temperature when most

of the crystals are stopped by the filter, is partly made up of nitrogen droplets. On the other hand, our fairly simple apparatus does not show us the size of the particles.

However, during vaporization, the liquid nitrogen droplets can only reach the section by passing through the anti-dust filter and the wire meshes of the settling chamber.

On the other hand, the average temperature and pressure conditions always stay relatively far from the nitrogen condensation limit ( $P = 2$  bars,  $T_{\text{balance}} = 84$  K). It is very likely that, for moderate quantities of droplets, the effectiveness of the anti-dust filter in eliminating them is considerable, stopping them and facilitating their thermal exchange with the gaseous flow.

One part of the increase of the filter charge loss can thus be attributed to an eventual retention of droplets, but from this point of view, the tests do not show significant effects.

- Retention of ice and dry ice by the anti-dust filter

Previously we presented the phenomenon of crystal retention by a filter in a seemingly simple manner, but its actual mechanism is without doubt quite complex. The tests show certain significant peculiarities.

The number of appearing crystals decreases <sup>/34</sup> readily and rapidly when the condensation threshold is passed in the phase of rapid temperature decrease and when the final test temperature is significantly lower than this threshold (tests at  $T_i = 150$  K, 100 K and 95 K in figures 27, 29 and 30).

When the final test temperature is near enough to crystallization conditions, the decrease in time of the number of particles is less clear (tests at  $T_i = 200$  K for ice and  $T_i = 120$  K for dry ice in figures 26 and 28). However, when the number of detected particles is traced as a function of the instantaneous generating temperature (figures 32 and 33), we find curves quite similar to those of the tests for which the decrease as a function of time is fastest.

Finally, when the temperature rises again at the end of the test, we systematically detect a brief passage of particles when the dry ice and ice condensation thresholds are passed.

The effectiveness of the anti-dust filter to retain the crystals thus seems to be related to the temperature spread between the flow and the crystallization threshold, and increases with it.

Near the condensation conditions, for the crystals retained by the filter, they might revaporize and condense again downstream.

- Effect of flow velocity on the light amplifier reading

During the phase of Mach number and pressure increase, we systematically confirm a decrease in the light amplifier reading (figures 27, 29 and 30) which can be attributed to a velocity effect. The light diffused by the laser beam depends on the velocity at which a given field of particles crosses it.

This phenomenon thus should not be forgotten when we compare, in absolute value, the light amplifier reading for

phenomena which occur at low velocity (ice, dry ice) to the reading obtained at  $M = 0.83$  (fluid condensation, dry ice, /35 and ice during the temperature rise at the end of the test at a high Mach number).

#### 4 - CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

At ambient temperature, the spectrum of pressure fluctuations was modified very little by the cryogenic adaptation of the system, and still meets the severe requirements of the L.E.H.R.T. project.

In cryogenic regime, the increase of the pressure fluctuation levels on the spectrum, seemingly related to that of the thermal turbulence, stays moderate.

However, when the test temperature decreases, the increase in average temperature fluctuation for frequencies of less than 50 Hz is clear and becomes all the more noticeable as a relative value. This phenomenon can be attributed to the lack of homogeneity of the mixture between the cold principal flow and the moving air at ambient temperature, as well as the lack of nitrogen cooling by spraying.

Certain test cases in natural transition are extremely sensitive to the level of flow noise, the transition position being significantly changed when  $\sqrt{T'_{\lambda}^2} / T_{\lambda}$  or  $\sqrt{U'^2} / U$  varies. It is thus suggested to do cross-checks between tests at ambient temperature, tests at high pressure, and cryogenic tests at the same Reynolds number before making a definitive statement on the effects of this increase on fluctuations in cryogenic regime.

In the future, a new dryer should see to it that the presence of water vapor and carbonic gas is considerably reduced in the wind tunnel, in which condensation during cryogenic tests was clearly shown. It will also be possible to operate entirely on nitrogen, refilling the moving air tank with pure nitrogen gas obtained by evaporation in the liquid phase.

The operating limit for low temperatures will thus be /36 related to fluid condensation in the section. Tests with particle detection, done in an empty section, already show that a generating temperature of 100 K is largely possible for transonic tests up to a generating pressure of 3 bars. Tests with a model will allow refining the operating range and seeing if local condensation in the high Mach number zones constitute the actual usage limit.

## REFERENCES

1. P. Carriere. "The injector driven tunnel" AGARD Lecture Series on Large Transonic Wind Tunnels, V.K.I., January 1973 and AGARD Report R-600-72.
2. R. Michel, C Quemard, A. Mignosi. "The induction driven tunnel T2 at ONERA/CERT: flow qualities, testing techniques and examples of results", Journal of Aircraft, Vol. 16, n 3 (March 79).
3. R. Michel. "A cryogenic transonic intermittent tunnel project: the induced-flow cryogenic wind-tunnel T2 at ONERA/CERT", AGARD Lecture Series No. 111 on Cryogenic Wind Tunnels (May 1980).
4. A. Blanchard, J. B. Dor, A. Mignosi, J. F. Breil. "Research on a cryogenic wind tunnel operating by induction," La Recherche Aérospatiale 1981-2 (March-April).
5. A. Mignosi, D. Faulmann, A. Seraudie. "The T2 transonic induction wind tunnel: operation at ambient temperature and cryogenic adaptation," La Recherche Aérospatiale 1981-3 (May-June).
6. R. Michel, A. Mignosi. "Adaptation and first cryogenic operation of ONERA/CERT's T2 wind tunnel." La Recherche Aérospatiale 1982-2 (March-April).
7. J. B. Dor, M. J. Payry. "Etude de faisabilité du prérefroidissement des maquettes pour la soufflerie cryogénique T2 [Feasibility study of precooling models for the T2 cryogenic wind tunnel]," R.T. OA No. 16/5007 AYD (DERAT No. 16/5007 DY), July 1982.
8. J. L. Govert, A. Mignosi. "Studies on cryogenic induction driven wind tunnel T2", ETW Cryogenic Technology Review Meeting, NLR, Amsterdam, 15-17 Sept. 83.
9. A. Blanchard, A. Mignosi. "Problems involved by the instrumentation and the conception of cryogenic tests". ETW Cryogenic Technology Review Meeting, NLR, Amsterdam, 15-17 Sept. 82.
10. J. B., A. Mignosi, M. Plazanet. "Qualification de la soufflerie T2 en fonctionnement cryogénique. A) Champ thermique. Etude préliminaire d'une maquette schématique [Verification of the T2 wind tunnel in cryogenic operation. A) Thermal field. Preliminary study of a schematic model]," R.T. OA No. 25/5006 AND (DERAT No. 25/5006 DN) September 1983.



11. G. François. "Thermal behavior and insulation of a cryogenic wind tunnel," ETW Cryogenic Technology Review Meeting, NLR, Amsterdam, 15-17, September 1983.
12. M. Dinguirard, G. Serrot, A. Blanchard, J. B. Dor. "Etude qualitative de l'apparition du brouillard d'azote dans la soufflerie cryogénique à induction T'2 [Qualitative study of the appearance of nitrogen fog in the T2 cryogenic induction wind tunnel]," Report 1/6059 - February 1980.
13. A. Seraudie, M. J. Payry. "Mise au point du système de prérefroidissement de profils adaptés aux essais de T2 cryogénique. Tests de mise en froid du profile CAST 7 [Adjustment of the system for precooling of airfoils adapted to T2 cryogenic tests. Tests on cooling the CAST 7 airfoil]." R.T. OA n 56/1685 AND (DERAT 2/5019 DN), October 1983.

## LIST OF FIGURES

- Fig. 1: General plan of the T2 cryogenic transonic wind tunnel and its limitations.
- Fig. 2: General view of the T2 wind tunnel.
- Fig. 3: Wind tunnel direction and control system.
- Fig. 4: Operating range of the T2 cryogenic wind tunnel.
- Fig. 5: Changes in control and operation parameters of the T2 wind tunnel during a cryogenic gust with the characteristics  $T_i = 95\text{ K}$ ,  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2\text{ bars}$ .
- Fig. 6: Kulite transducer mountings on the wall of the stream, used to measure pressure fluctuations.
- Fig. 7: Variation of the sensitivity, internal impedance, and zero pressure indication of the K1 Kulite transducer, as a function of its temperature.
- Fig. 8: Examples of cooling a Kulite transducer mounted at the wall of the stream (K1 device) during cryogenic gusts at  $M = 0.8$  and at various temperature levels.
- Fig. 9: Pressure signals measured by the Kulite transducers at the wall during tests at  $M = 0.8$ ,  $P_i = 2\text{ bars}$  and at various generating temperatures, with the throat upstream of the working section started.
- Fig. 10: Pressure signals measured by the Kulite transducers at the wall during tests at  $M = 0.8$ ,  $P_i = 2\text{ bars}$  and at various generating temperatures, with the throat upstream of the working section started.

- Fig. 11: Comparison of the pressure fluctuation spectra at low frequency, obtained by the K1 and K2 devices during a test at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars and  $T_i = 150$  K.
- Fig. 12: Pressure fluctuation spectra measured with the K1 device at test temperatures  $T_i = 120$  K,  $T_i = 150$  K and T Room, for  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars, with the upstream throat started.
- Fig. 13: Pressure fluctuation spectra at low frequency, measured with the K1 device, at various test temperatures, for  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars.
- Fig. 14: Change of the level of pressure fluctuation at low frequency as a function of the test temperature, at  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars.
- Fig. 15: Diagram and notation of the RdF copper-constantan thermocouple temperature sensors.
- Fig. 16: Temperature signals measured by the cold wire with a diameter of  $9\mu$  and the thermocouple sensors during tests at  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars, at generating temperatures  $T_i = 120$  K,  $T_i = 150$  K, and T Ambient.
- Fig. 17: Temperature fluctuation spectra obtained at ambient temperature,  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars, with various measurement methods.
- Fig. 18: Temperature fluctuation spectra obtained at  $T_i = 150$  K,  $M = 0.83$ , and  $P_i = 2$  bars, with various measurement methods.
- Fig. 19: Temperature fluctuation spectra obtained at  $T_i = 120$  K,  $M = 0.83$ , and  $P_i = 2$  bars, with various measurement methods.

- Fig. 20: Summary of the temperature fluctuation spectra measured using the cold wire ( $\varnothing = 9\mu$ ) at generating temperatures of 120 K, 150 K, and 295 K, at  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars.
- Fig. 21: Examples of temperature fluctuation spectra measured at low frequency by the cold wire, at various temperature levels, at  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars.
- Fig. 22: Examples of temperature fluctuation spectra obtained at low frequency with the thermocouple sensor measuring  $T_i$  in the settling chamber, at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars and at various temperature levels.
- Fig. 23: Change of the average quadratic temperature fluctuation level, in relative and absolute value, as a function of the test temperature, at  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars.
- Fig. 24: Diagram of the optical particle detection apparatus.
- Fig. 25: Change, as a function of time, in the generating temperature of the flow, the charge loss of the anti-dust filter in the chamber, and the light amplifier signal during a cryogenic gust at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars, and  $T_i = 250$  K.
- Fig. 26: Change, as a function of time, in the generating temperature of the flow, the charge loss of the anti-dust filter in the chamber, and the light amplifier signal during a cryogenic gust at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars, and  $T_i = 200$  K.

Fig. 27: Change, as a function of time, in the generating temperature of the flow, the charge loss of the anti-dust filter in the chamber, and the light amplifier signal during a cryogenic gust at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars, and  $T_i = 150$  K.

Fig. 28: Change, as a function of time, in the generating temperature of the flow, the charge loss of the anti-dust filter in the chamber, and the light amplifier signal during a cryogenic gust at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars, and  $T_i = 120$  K.

Fig. 29: Change, as a function of time, in the generating temperature of the flow, the charge loss of the anti-dust filter in the chamber, and the light amplifier signal during a cryogenic gust at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars, and  $T_i = 100$  K.

Fig. 30: Change, as a function of time, in the generating temperature of the flow, the charge loss of the anti-dust filter in the chamber, and the light amplifier signal during a cryogenic gust at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars, and  $T_i = 95$  K.

Fig. 31: Large-scale representation of the change in generating temperature of the flow and of the injected liquid nitrogen flow, while detecting a significant passage of particles at low temperature, during the test at  $T_i = 95$  K,  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars.

Fig. 32: Representation of the light amplifier indication as a function of the instantaneous generating temperature of the flow, for tests at  $T_i = 95$  K,  $M = 0.83$ , and  $P_i = 2$  bars.

- Fig. 33: Representation of the light amplifier indication as a function of the instantaneous generating temperature of the flow, for tests at  $T_i = 120$  K,  $M = 0.83$ , and  $P_i = 2$  bars.
- Fig. 34: Representation of the light amplifier indication as a function of the instantaneous generating temperature of the flow, for tests at  $T_i = 100$  K,  $M = 0.83$ , and  $P_i = 2$  bars.
- Fig. 35: Representation of the light amplifier indication as a function of the instantaneous generating temperature of the flow, for tests at  $T_i = 95$  K,  $M = 0.83$ , and  $P_i = 2$  bars.
- Fig. 36: Vapor-solid equilibrium curve for the carbonic gas, for low pressures, in the diagram (P,T).
- Fig. 37: Moisture curves for oxygen-nitrogen mixtures in the diagram (P,T).
- Fig. 38: Condensation curves for pure nitrogen flow in the working section, as a function of the test parameters: parameter representation following M in the drawing ( $P_i$ ,  $T_i$ ).
- Fig. 39: Moisture curves for nitrogen-air mixture (89%  $N_2$  - 11%  $O_2$ ) in the working section, as a function of the flow parameters ( $M$ ,  $P_i$ ,  $T_i$ ).

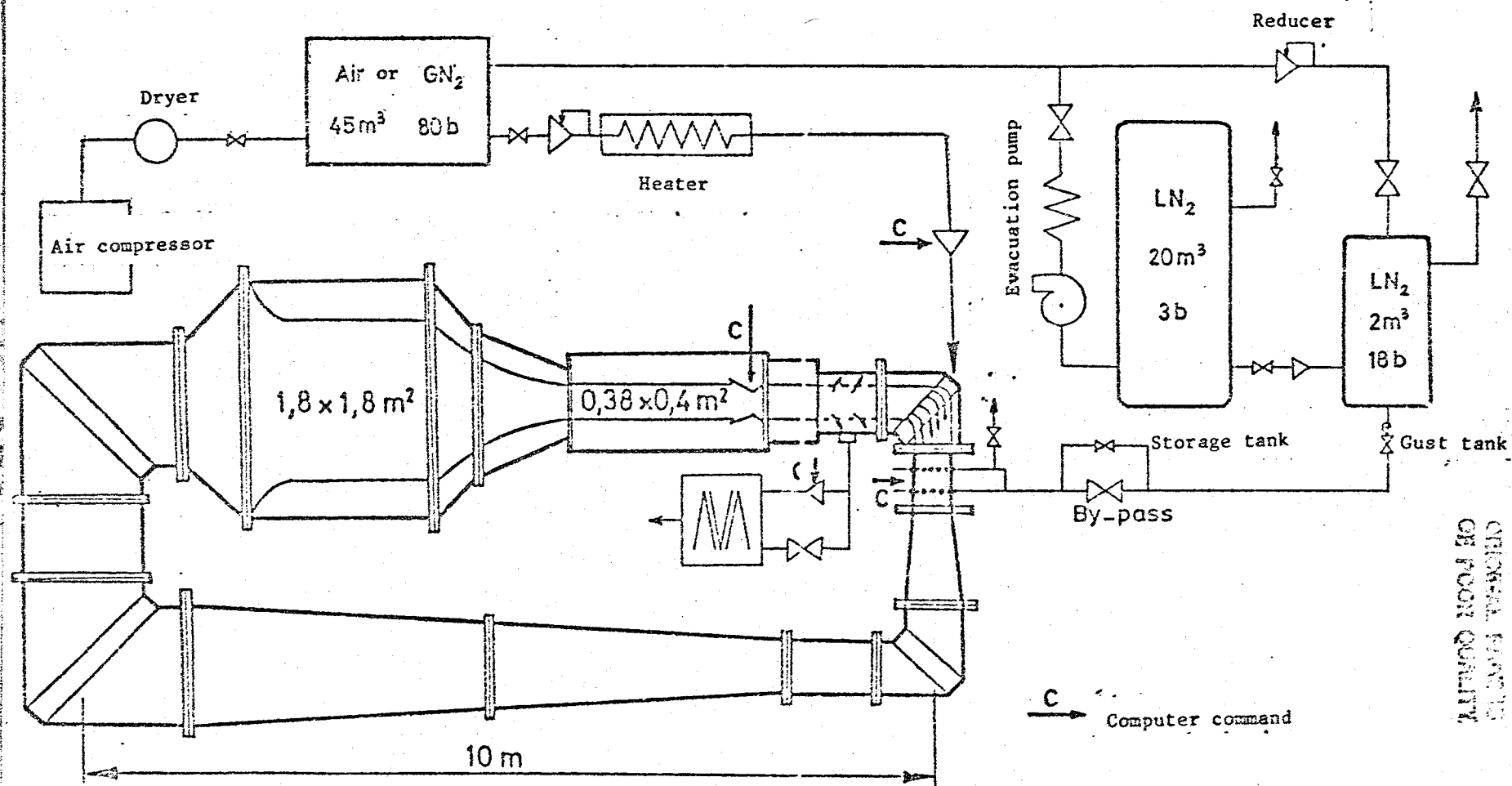


Fig. 1: General plan of the T2 cryogenic transonic wind tunnel and its limitations.

ORIGINAL PART OF  
OF POON QUALITY

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY



Fig. 2: General view of the T2 wind tunnel.



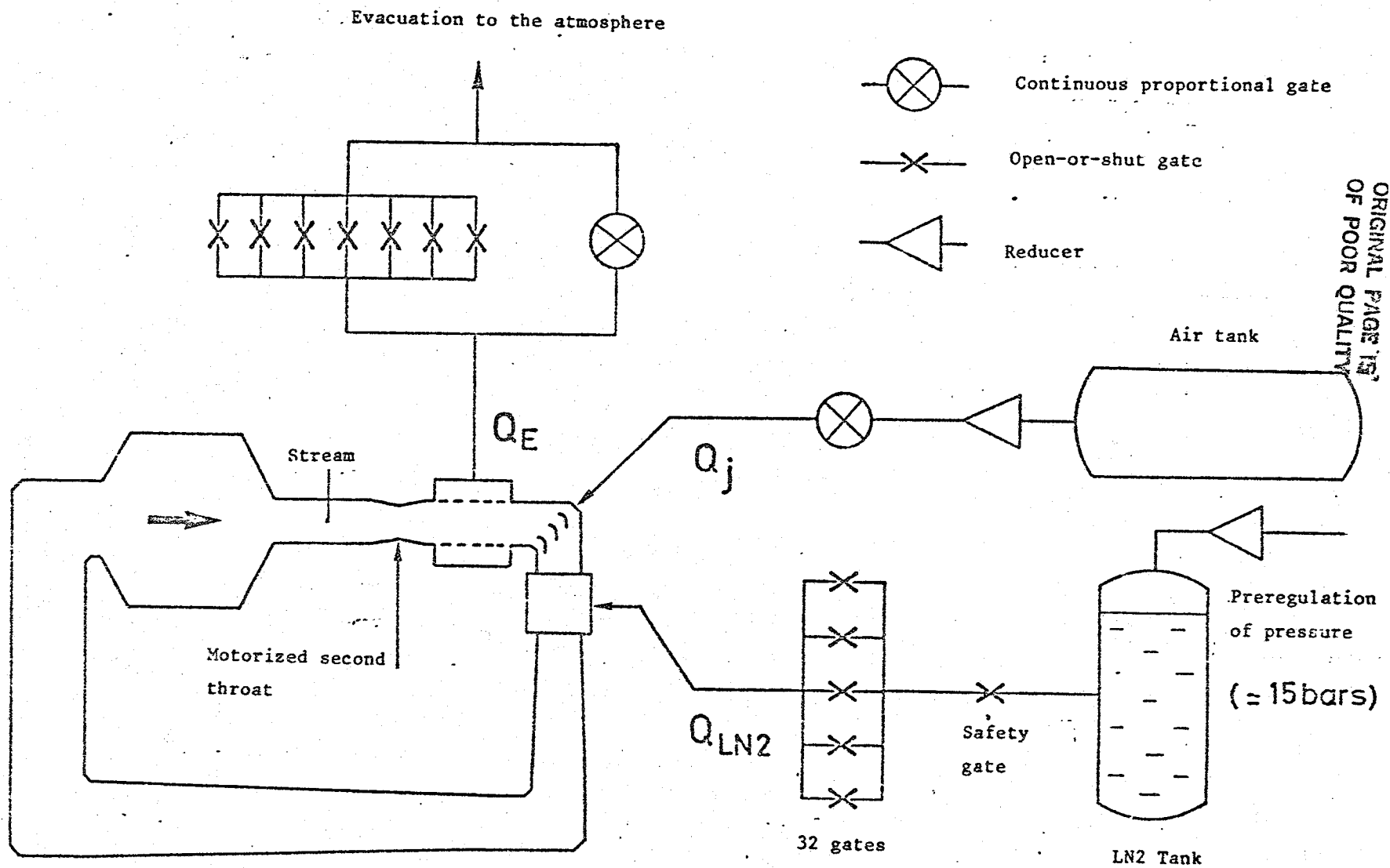


Fig. 3: Wind tunnel direction and control system.

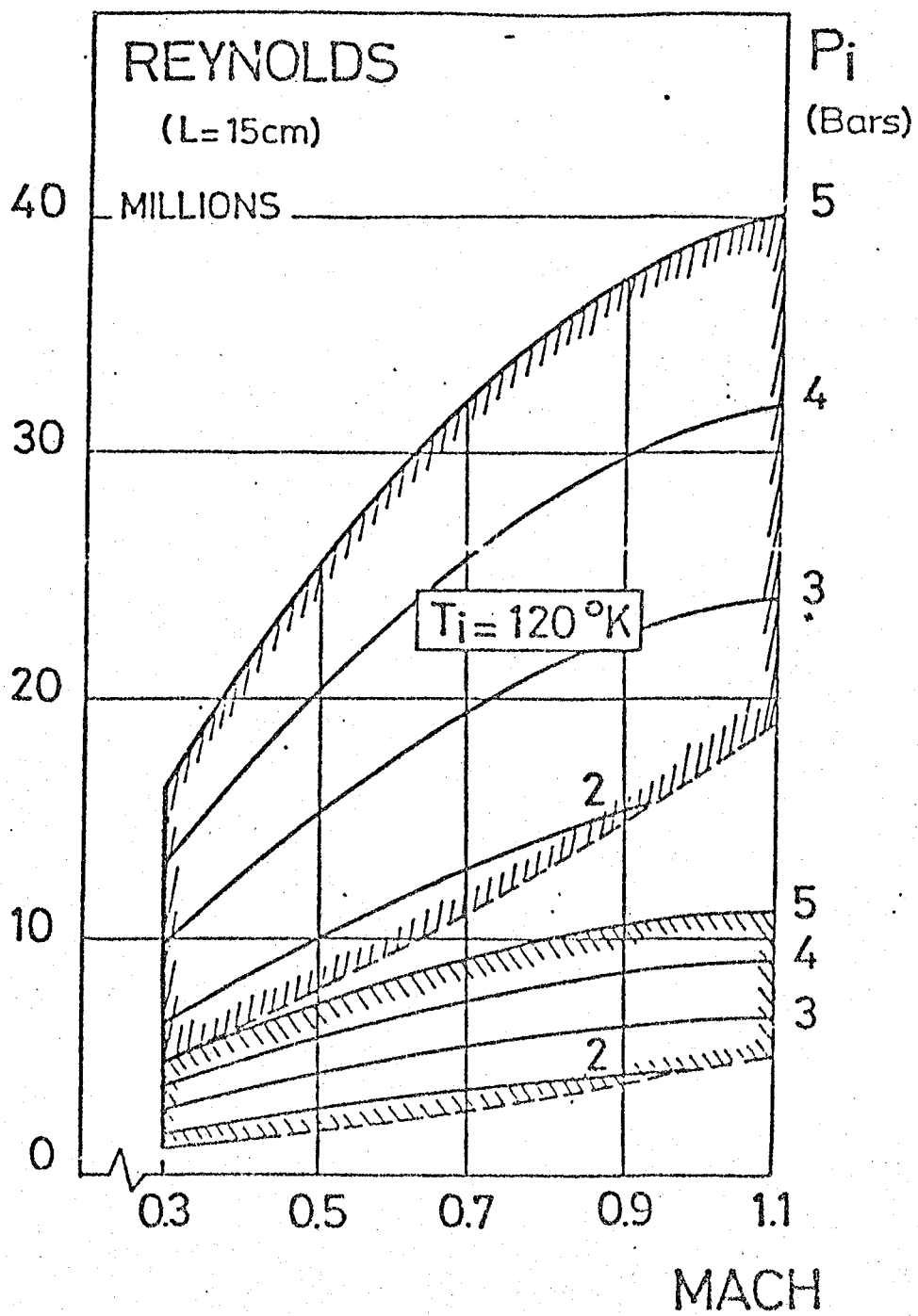


Fig. 4: Operating range of the T2 cryogenic wind tunnel.

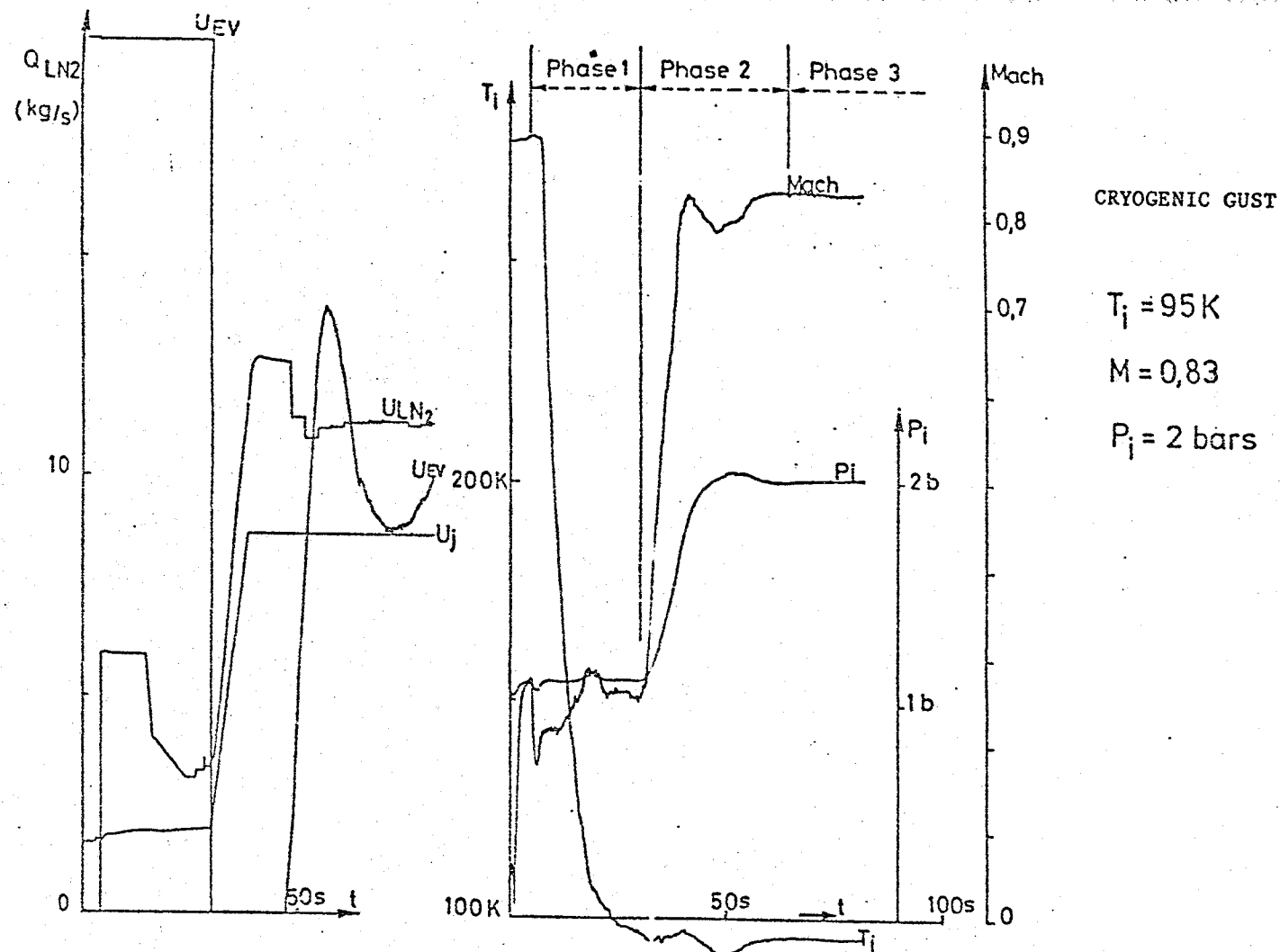
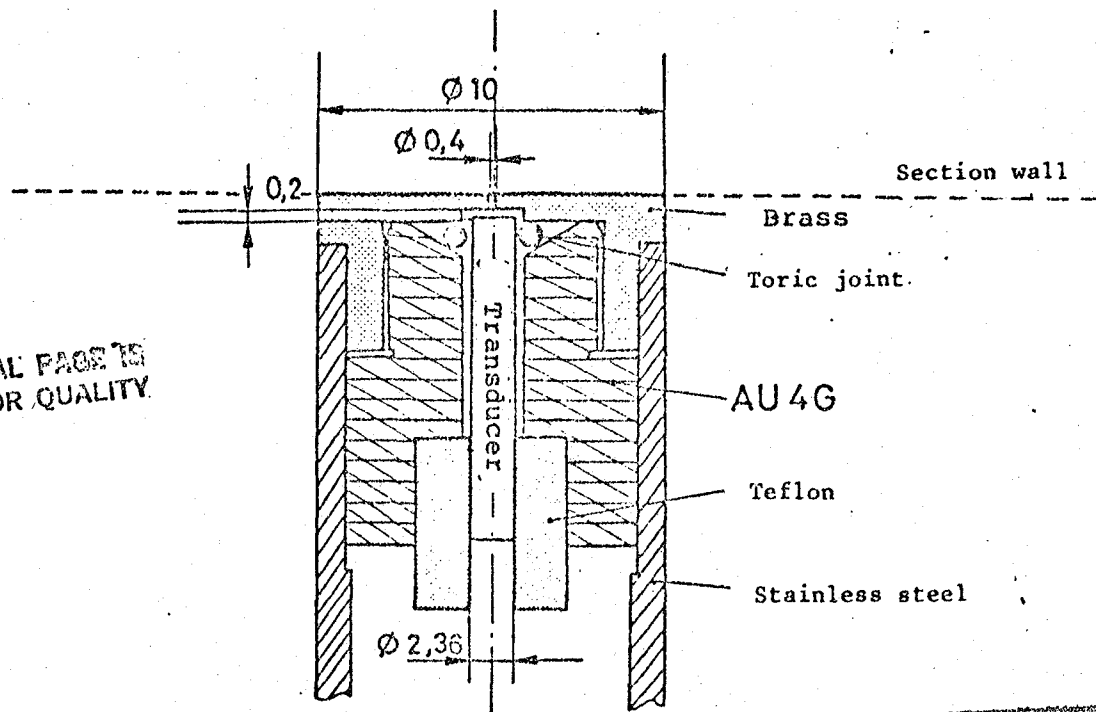
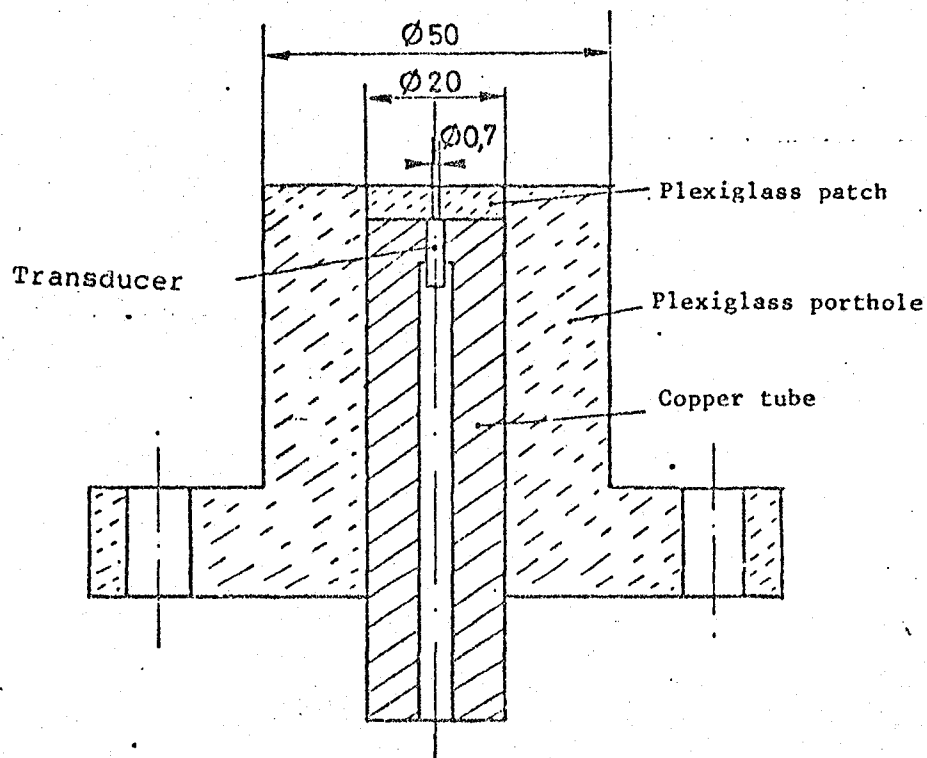


Fig. 5: Changes in control and operation parameters of the T2 wind tunnel T2 during a cryogenic gust with the characteristics  $T_i = 95\text{ K}$ ,  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2\text{ bars}$ .

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

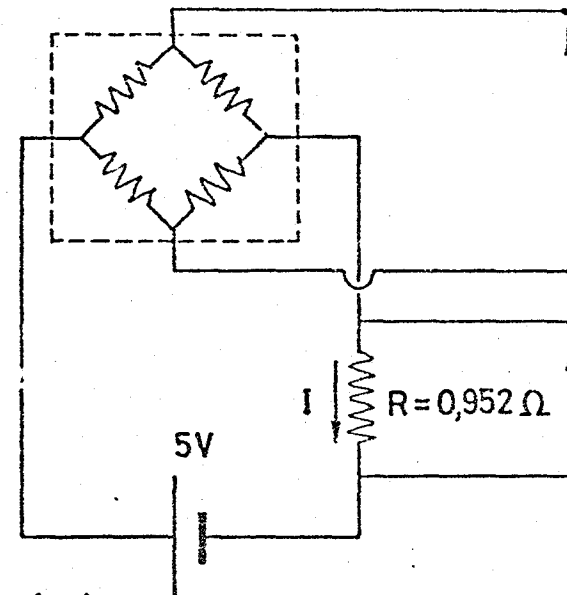
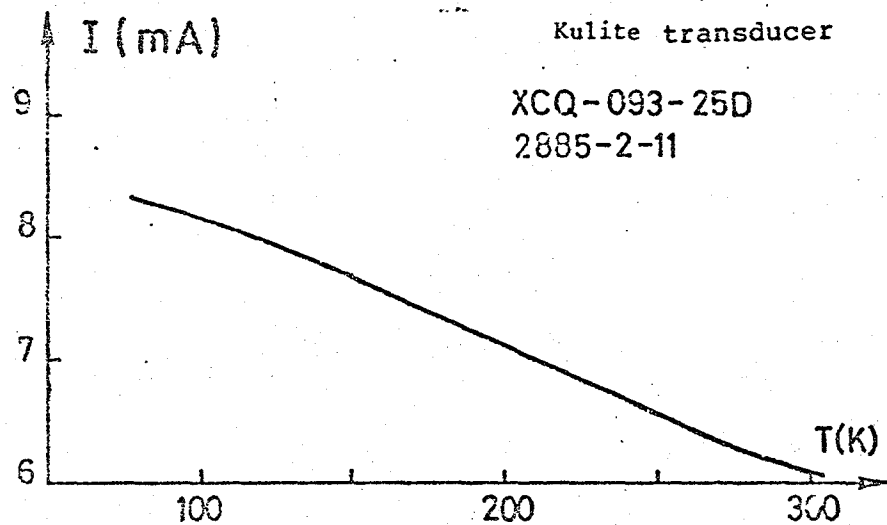


(K1) Device with toric joint (Scale: 5)  
(Kulite XCQ-093-25D 2885-2-11)

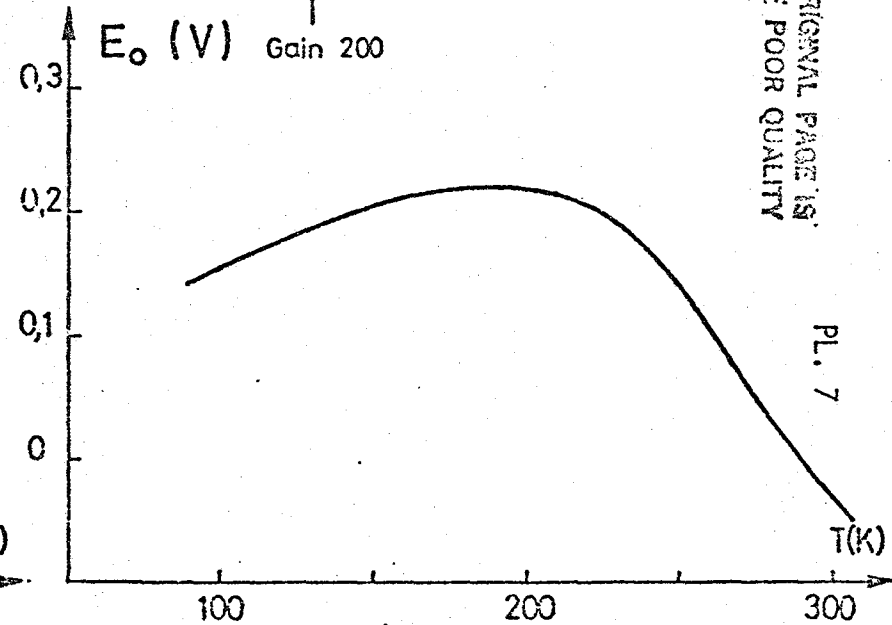
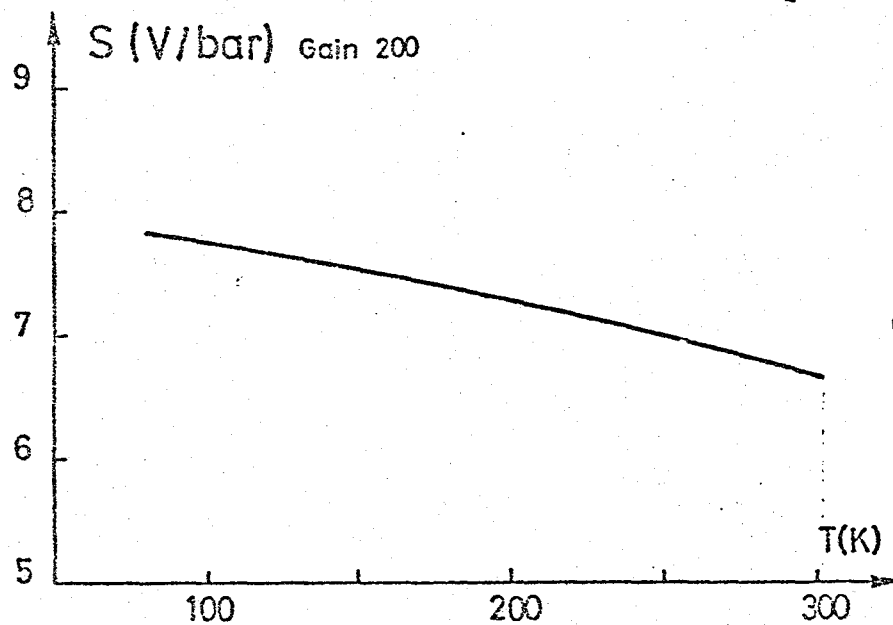


(K2) Device in plexiglass case (Scale: 1)

Fig. 6: Kulite transducer mountings on the wall of the stream, used to measure pressure fluctuations.



ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY



PL. 7

Fig. 7: Variation of the sensitivity, internal impedance, and null pressure indication of the K1 Kulite transducer, as a function of its temperature.

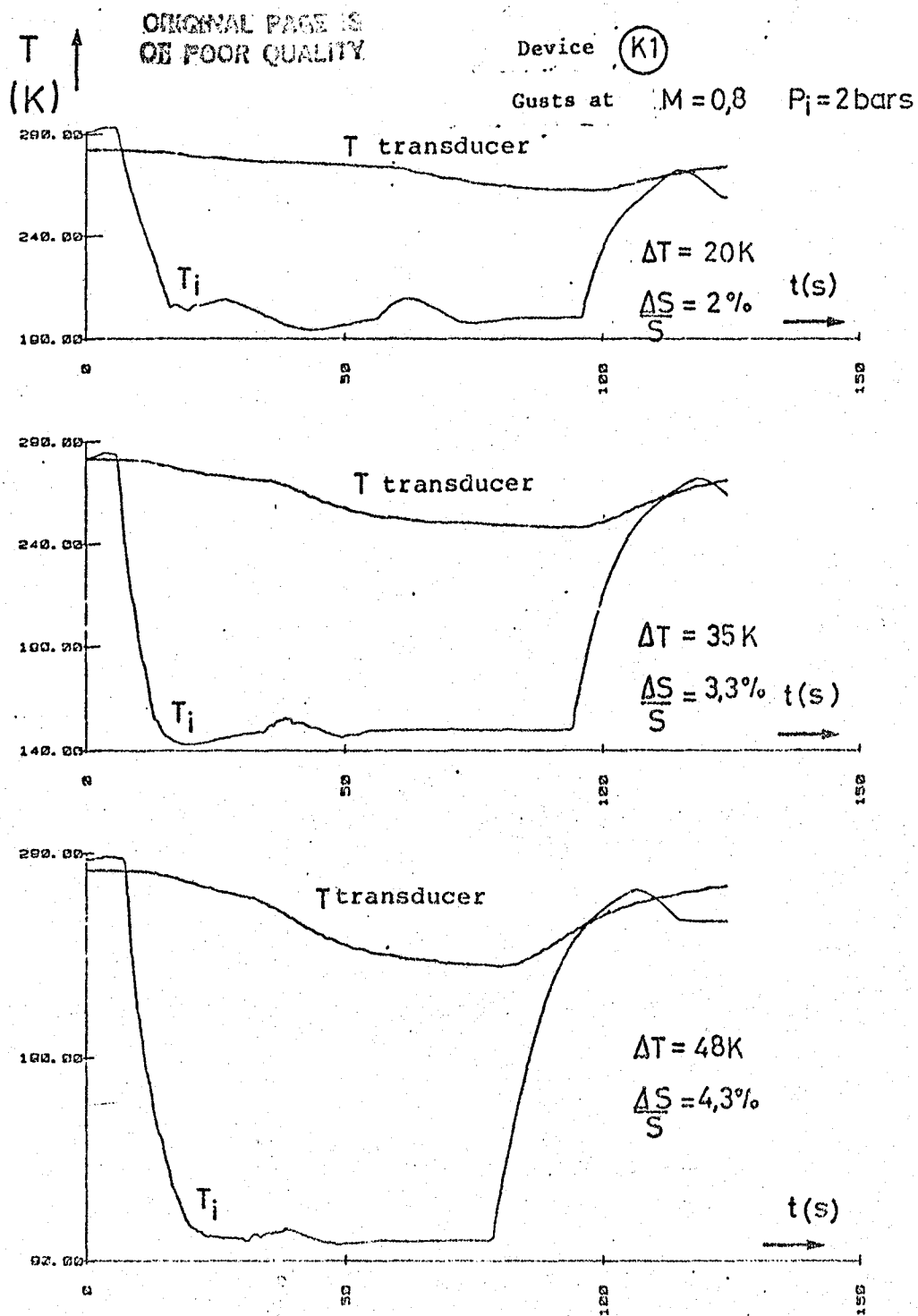


Fig. 8: Examples of cooling a Kulite transducer mounted at the wall of the stream (K1 device) during cryogenic gusts at  $M = 0.8$  and at diverse temperature levels.

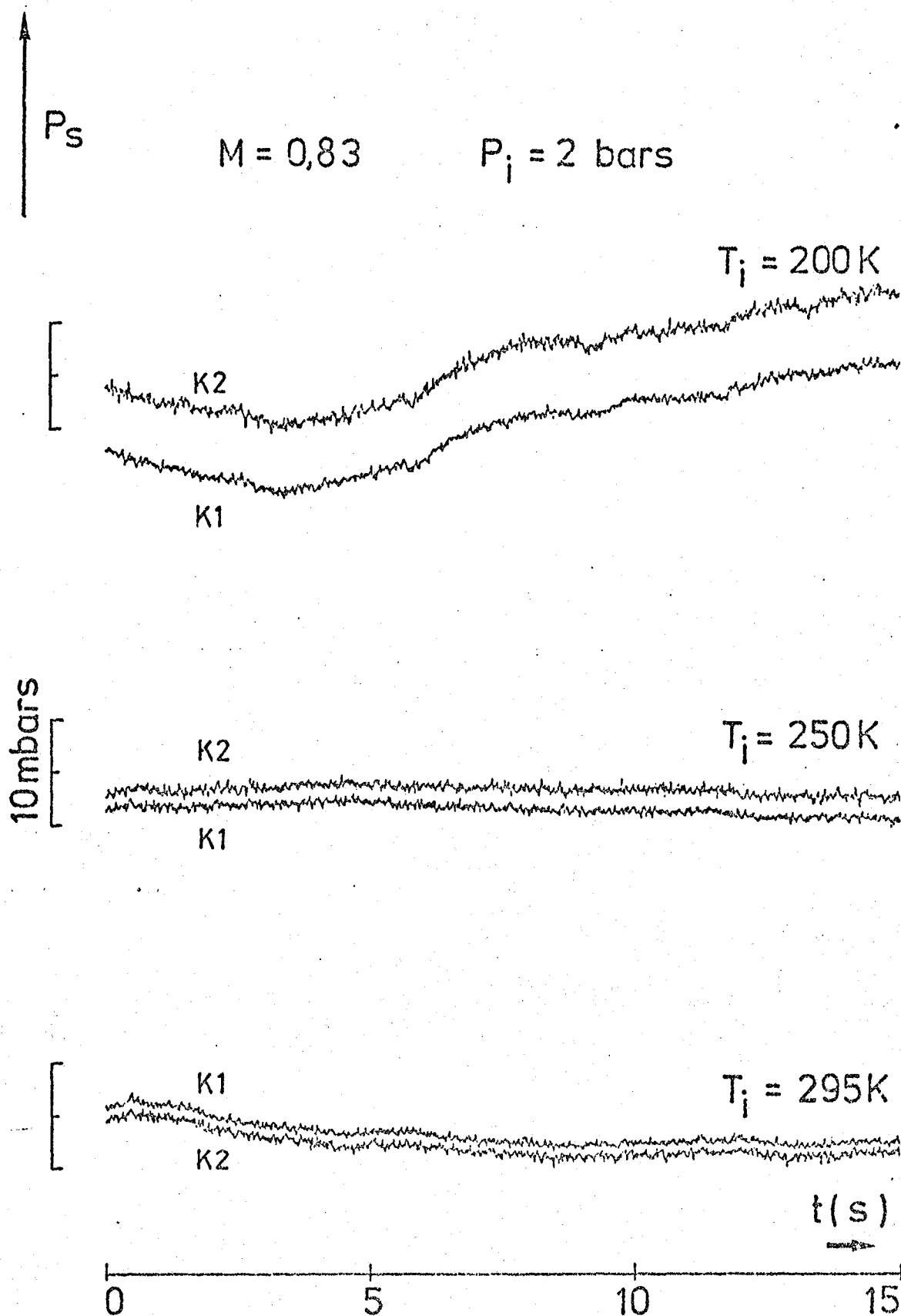


Fig. 9: Pressure signals measured by the Kulite transducers at the wall during tests at  $M = 0.8$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  and at various generating temperatures, with the throat upstream of the working section started.

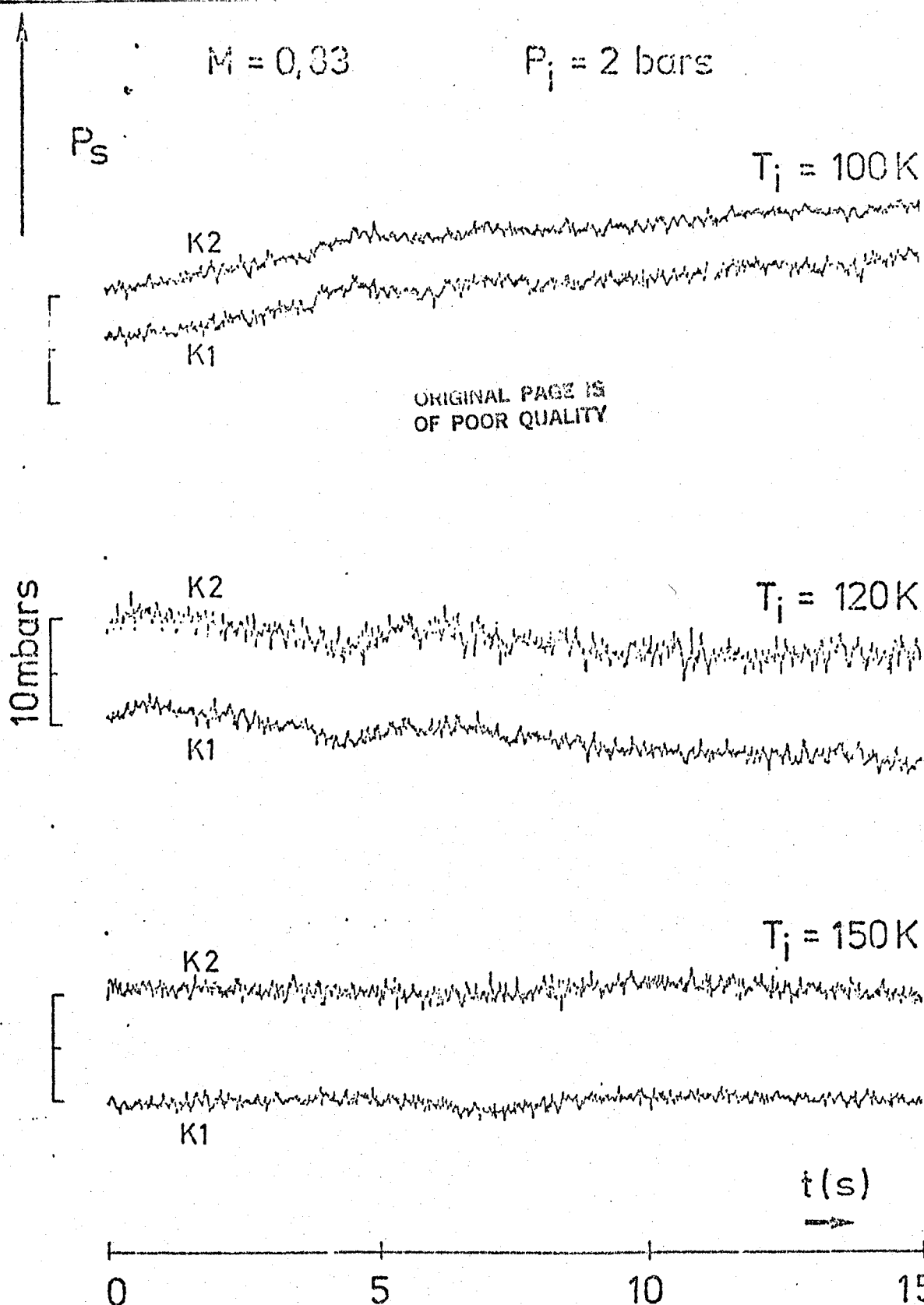


Fig. 10: Pressure signals measured by the Kulite transducers at the wall during tests at  $M = 0.8$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  and at various generating temperatures, with the throat upstream of the working section started.



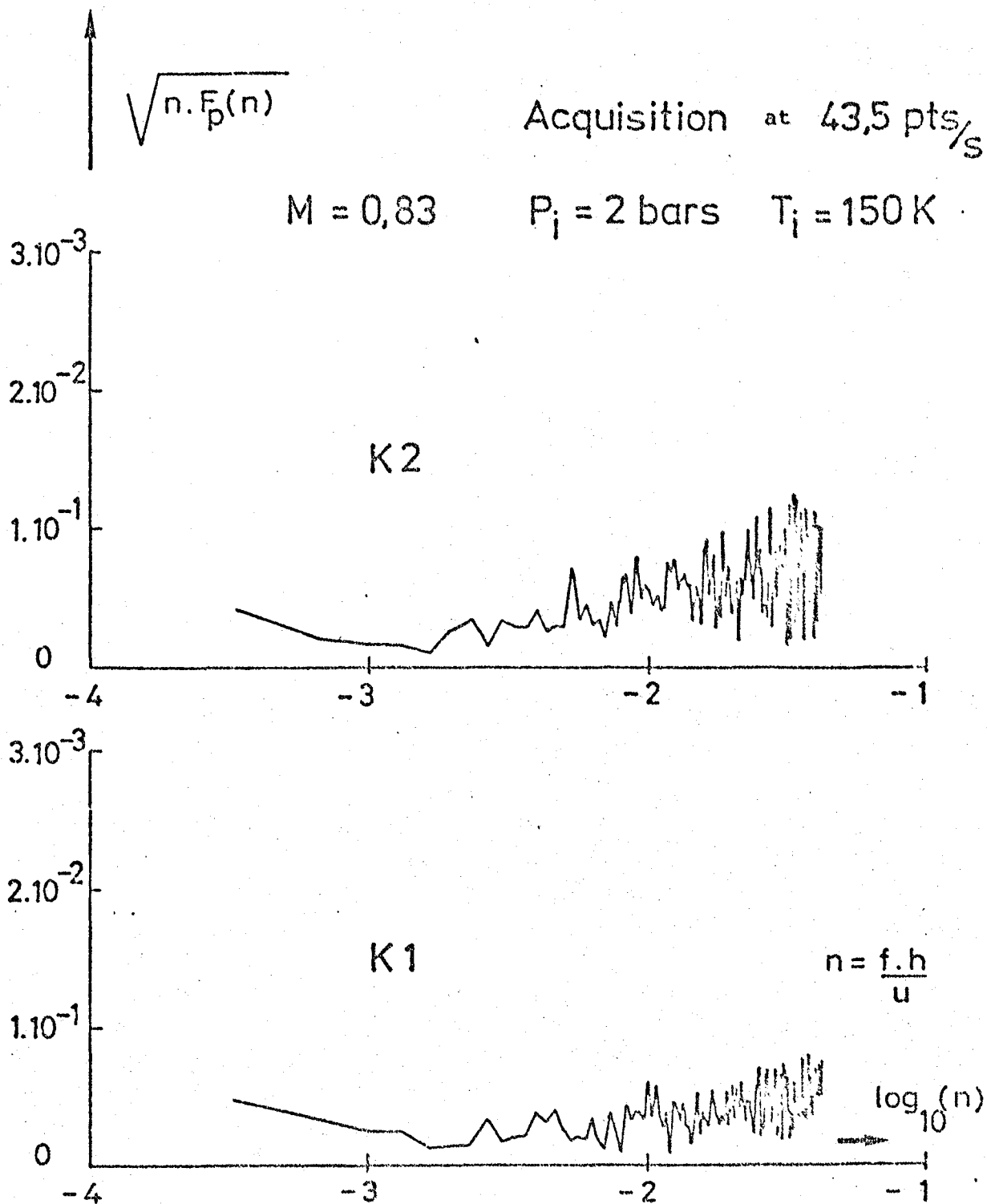


Fig. 11: Comparision of the pressure fluctuation spectra at low frequency, obtained by the K1 and K2 devices during a test at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars and  $T_i = 150 \text{ K}$ .

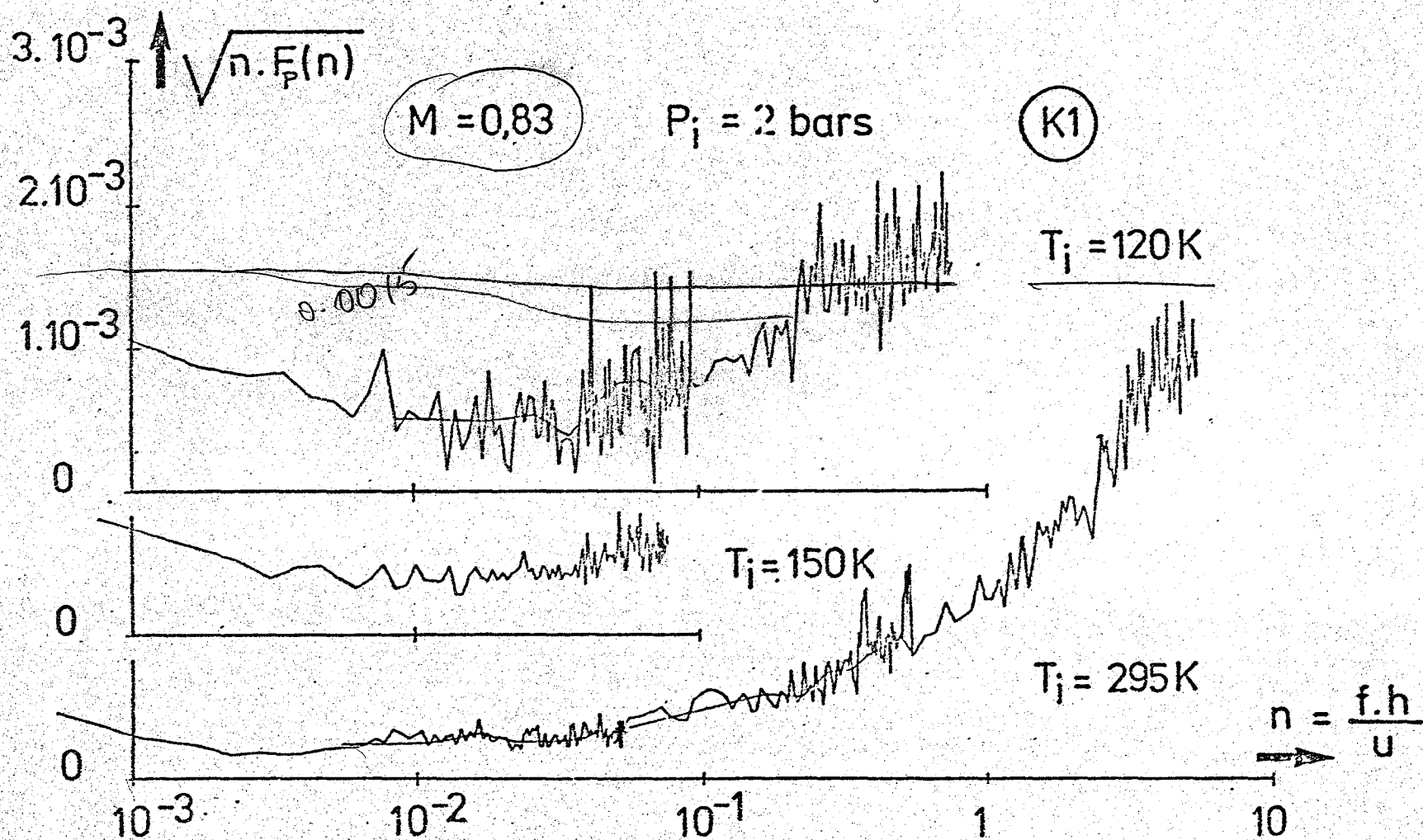


Fig. 12: Pressure fluctuation spectra measured with the K1 device at test temperatures  $T_i = 120 \text{ K}$ ,  $T_i = 150 \text{ K}$  and  $T_{\text{Room}}$ , for  $M = 0.83$  and  $P_i = 2 \text{ bars}$ , with the upstream throat started.

(K1) Acquisition at 43,5pts/s

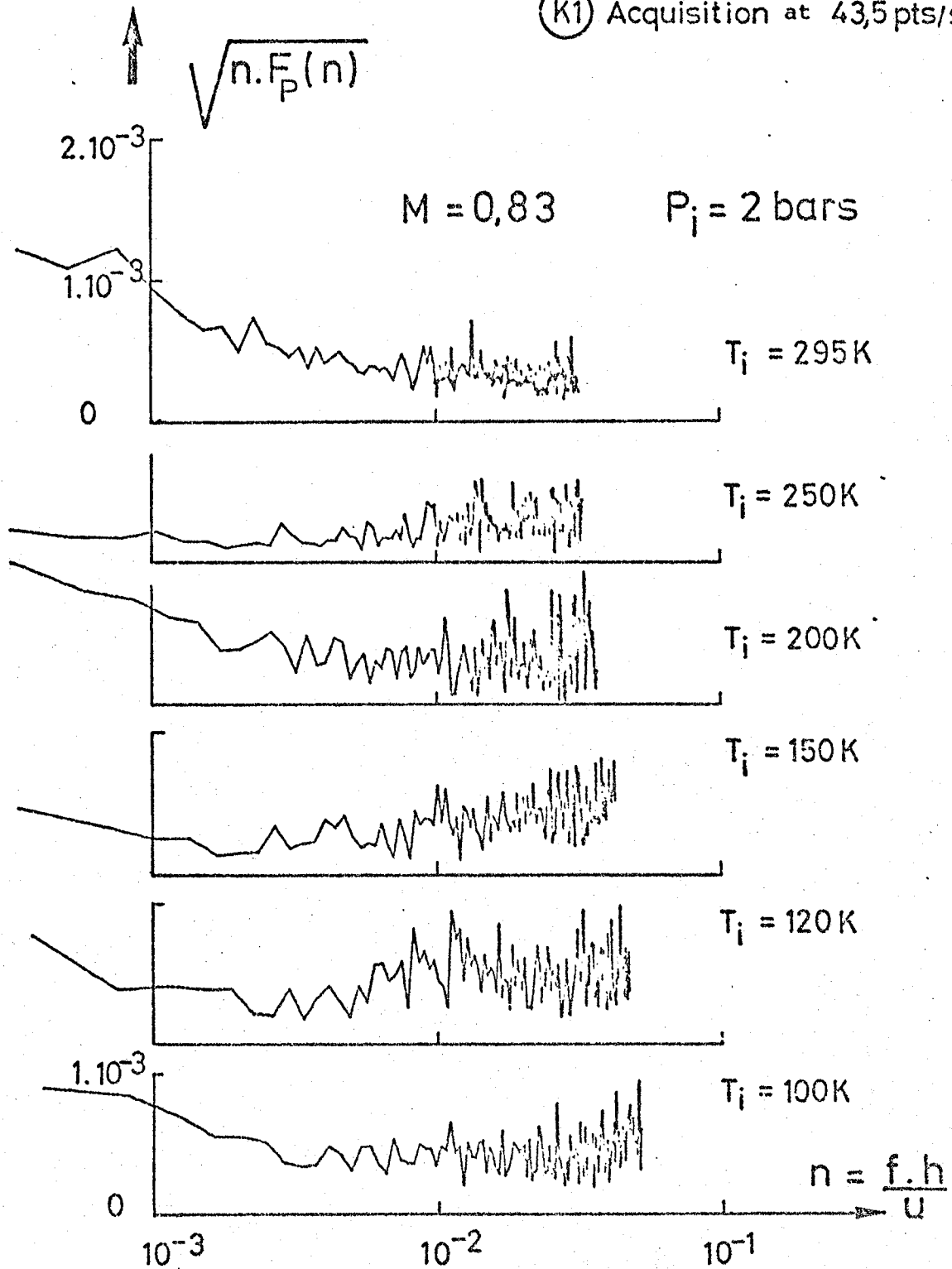


Fig. 13: Pressure fluctuation spectra at low frequency, measured with the K1 device, at various test temperatures, for  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars.

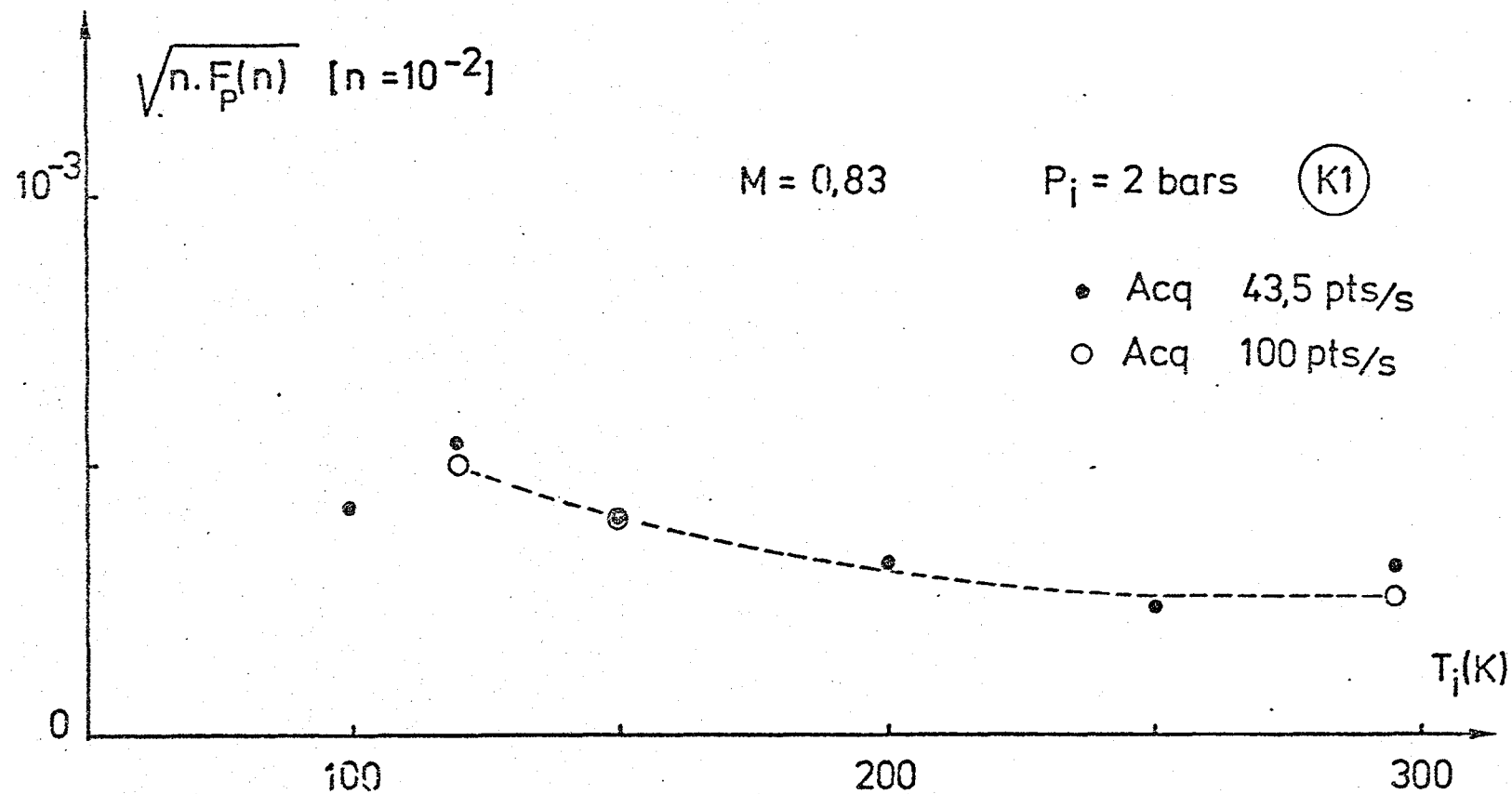
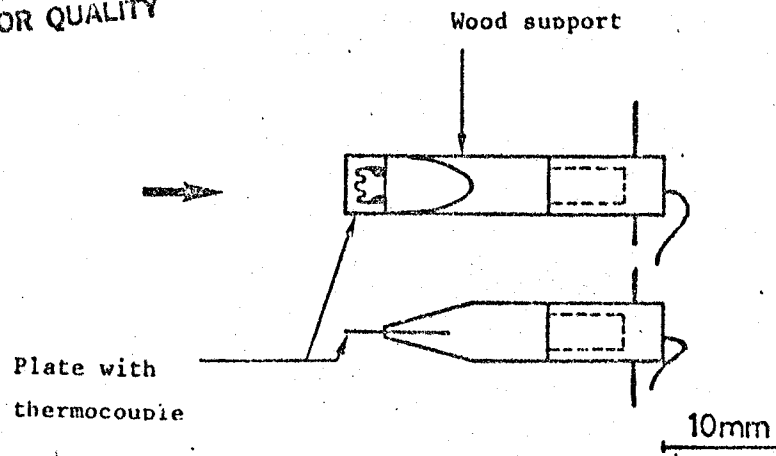


Fig. 14: Change of the level of pressure fluctuation at low frequency as a function of the test temperature, at  $M = 0.83$  and  $P_i = 2 \text{ bars}$ .

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY



A) "RECOVERY" SENSING LINE

Settling chamber

Working section

Ti  
Tisr

B) STOPPAGE SENSOR

Working section

Tisø

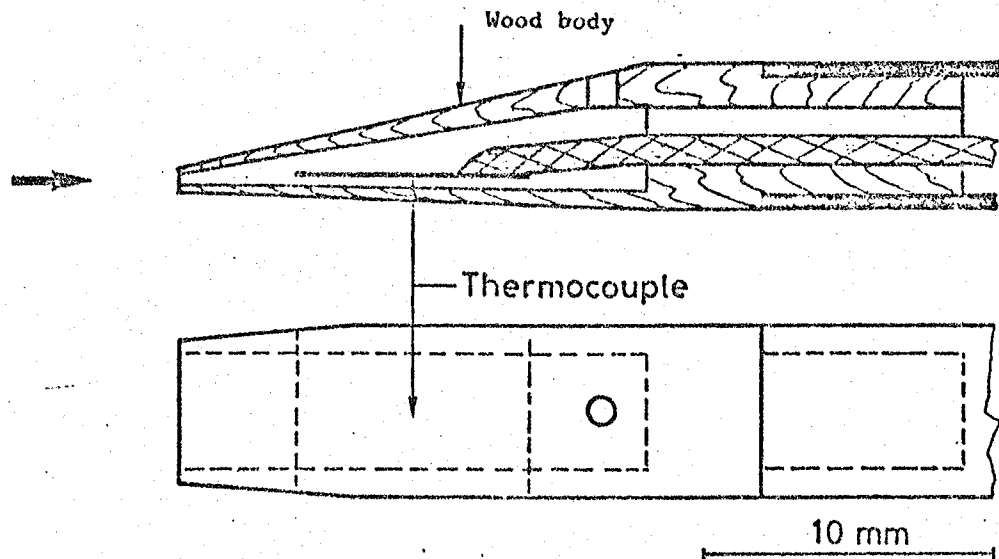
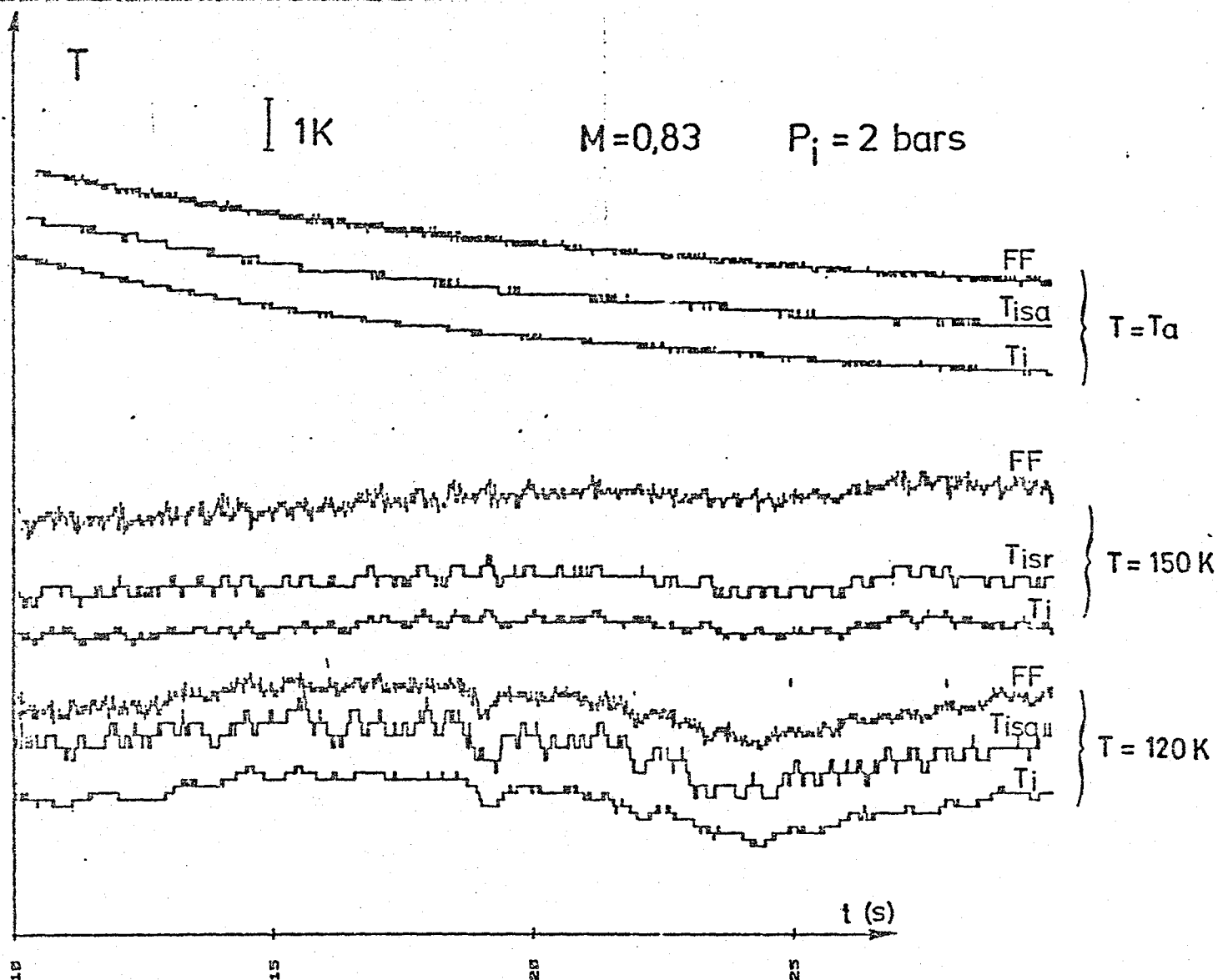


Fig. 15: Diagram and notation of the RdF copper-constantan thermocouple temperature sounding lines.



ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

Fig. 16: Temperature signals measured by the cold wire with a diameter of 9  
 and the thermocouple sensors during tests at  $M = 0.83$  and  $P_i = 2 \text{ bars}$ , at generating temperatures  $T_i = 120 \text{ K}$ ,  $T_i = 150 \text{ K}$ , and  $T$   
 Room.

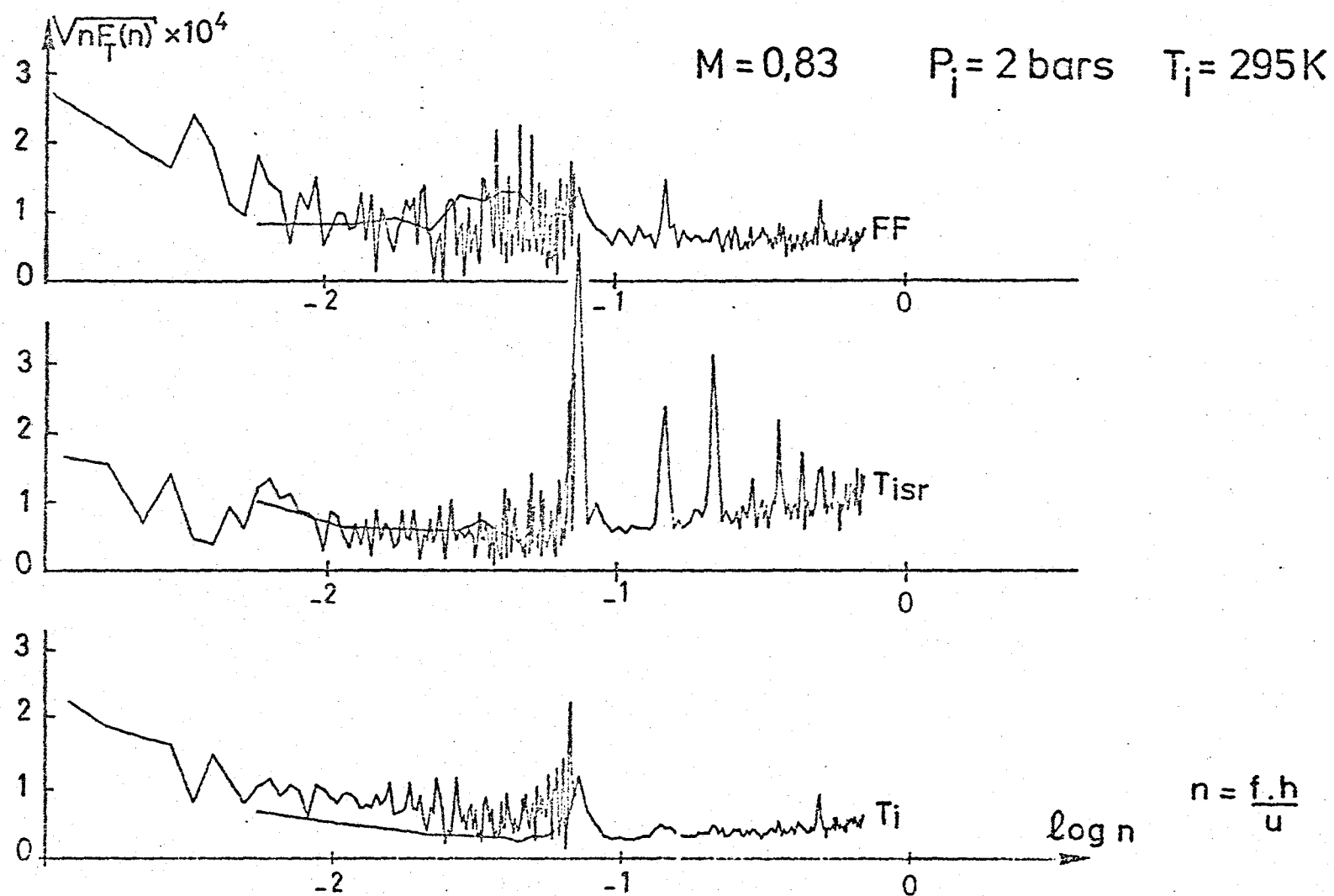
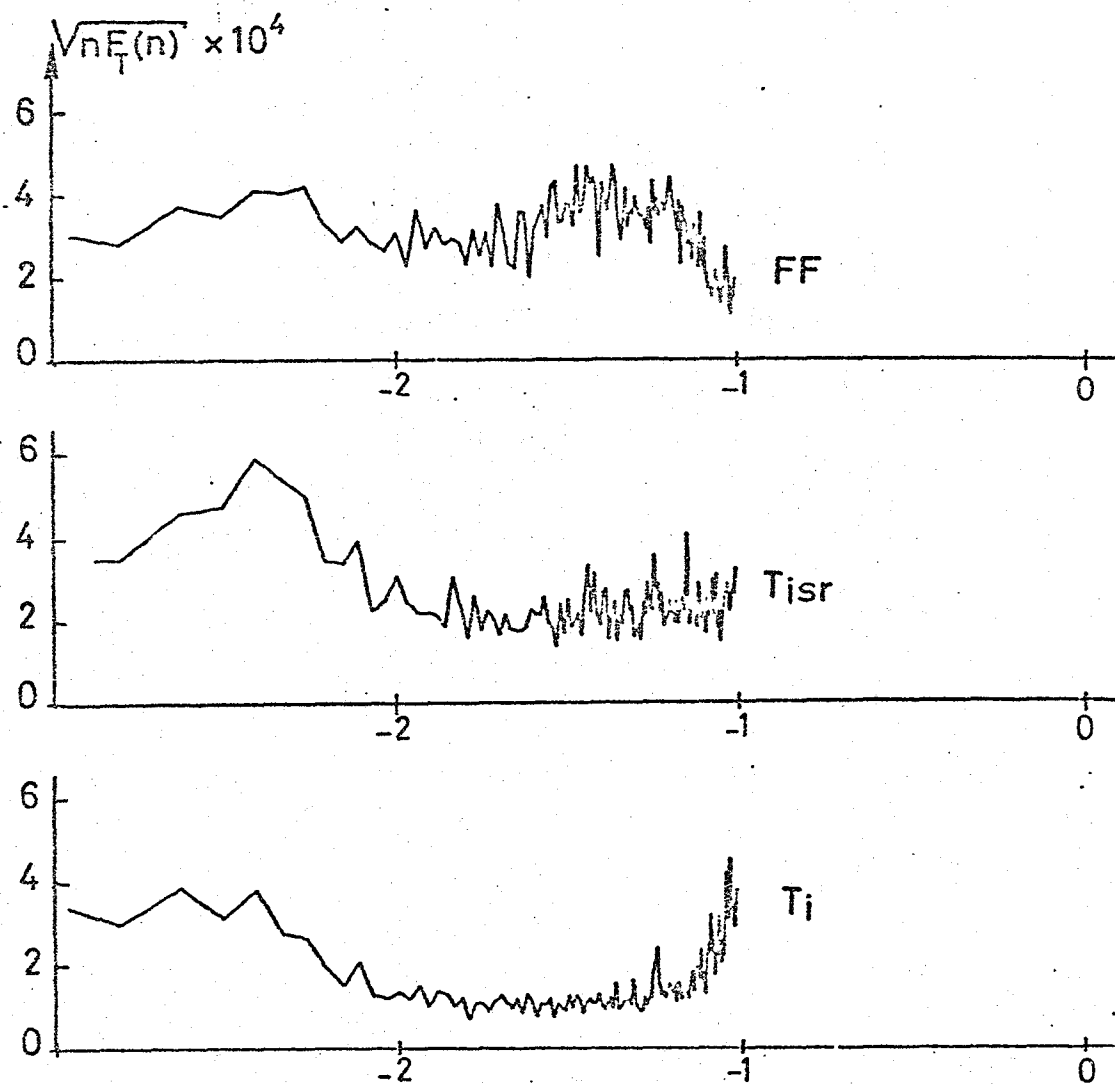


Fig. 17: Temperature fluctuation spectra obtained at room temperature,  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars, with various measurement methods.



$M = 0.83$   
 $P_i = 2 \text{ bars}$   
 $T_i = 150 \text{ K}$

$$n = \frac{f \cdot h}{u}$$

Fig. 18: Temperature fluctuation spectra obtained at  $T_i = 150 \text{ K}$ ,  $M = 0.83$ , and  $P_i = 2 \text{ bars}$ , with various measurement methods.



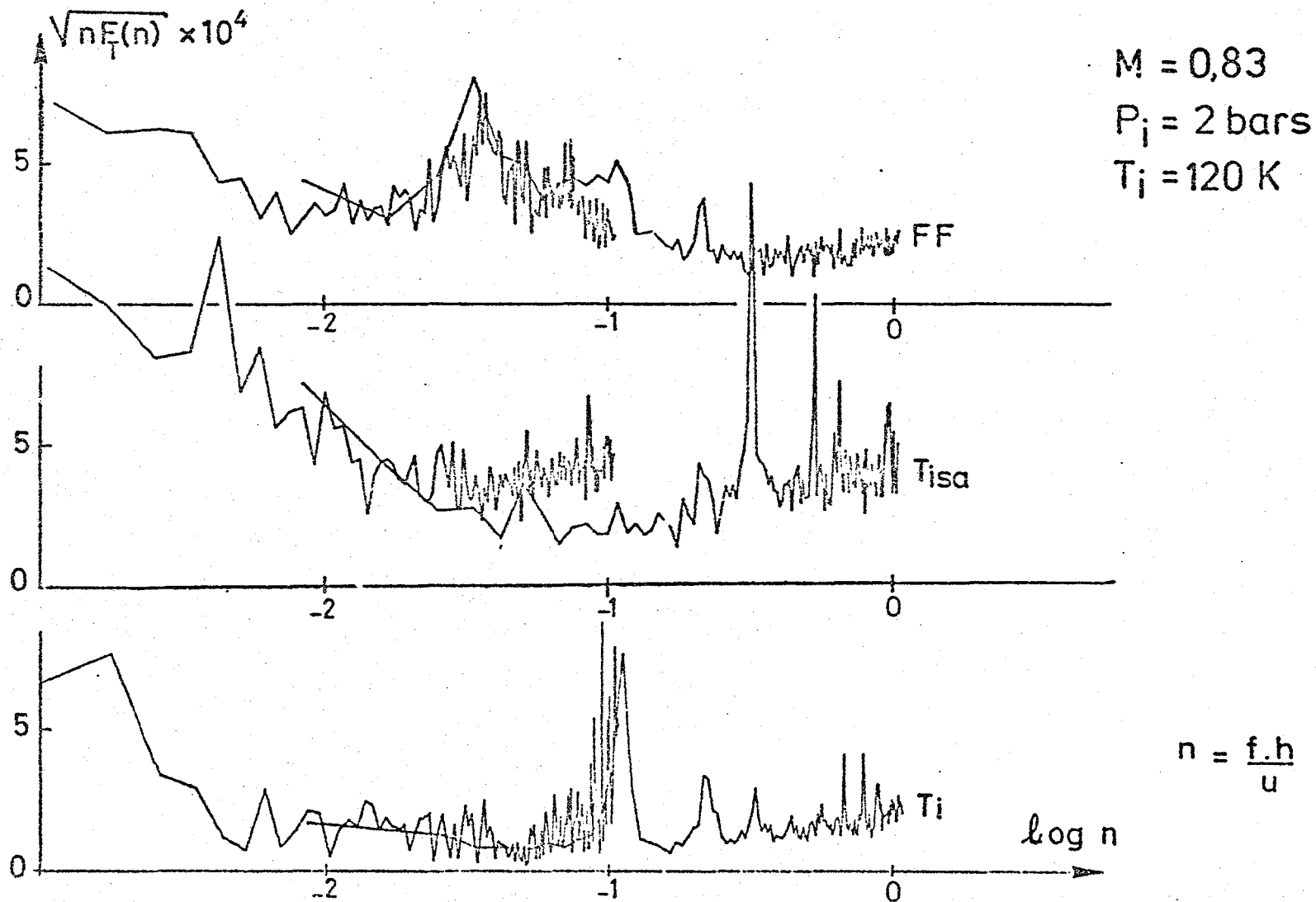


Fig. 19: Temperature fluctuation spectra obtained at  $T_i = 120 \text{ K}$ ,  $M = 0.83$ ,  
 and  $P_i = 2 \text{ bars}$ , with various measurement methods.

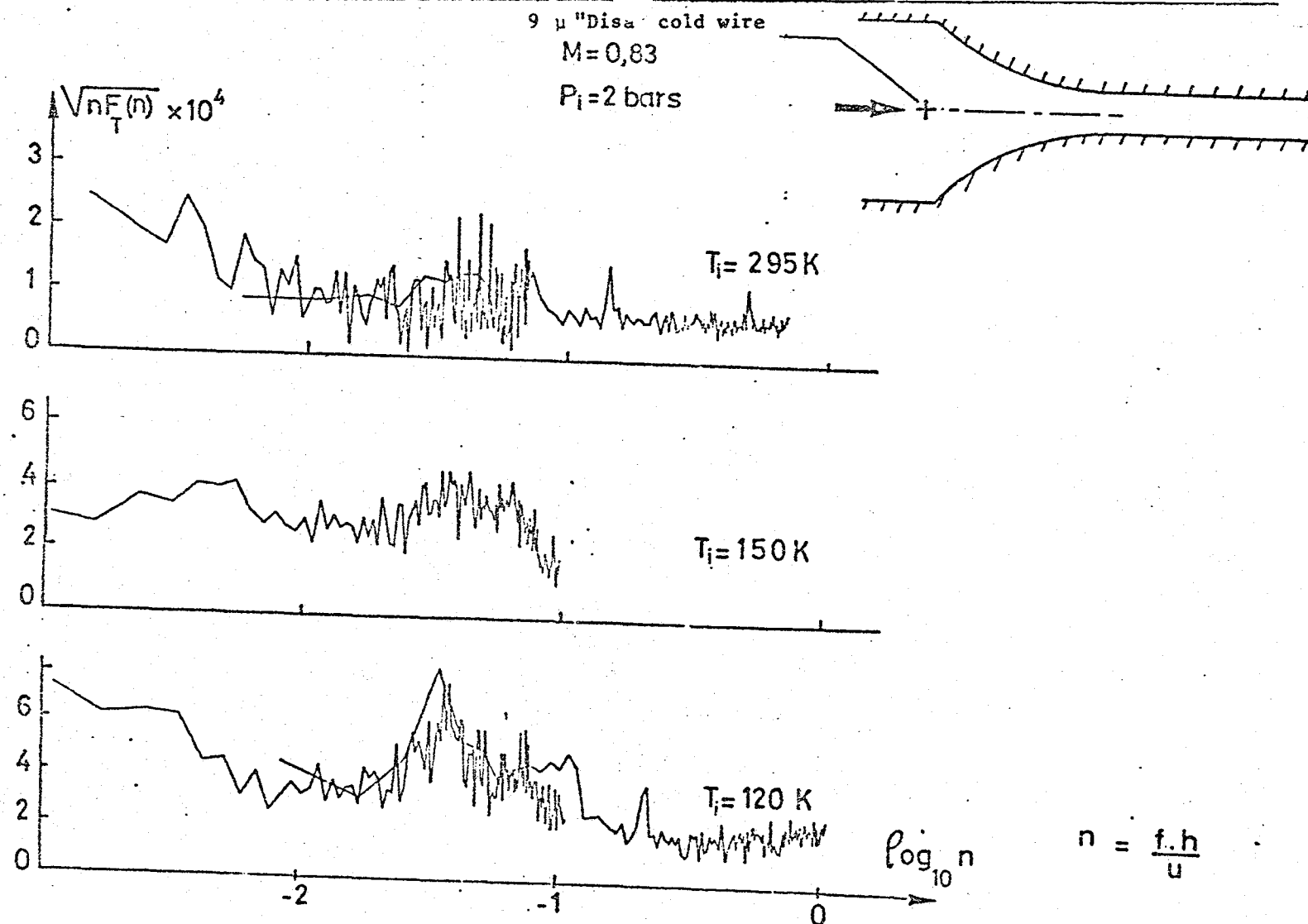
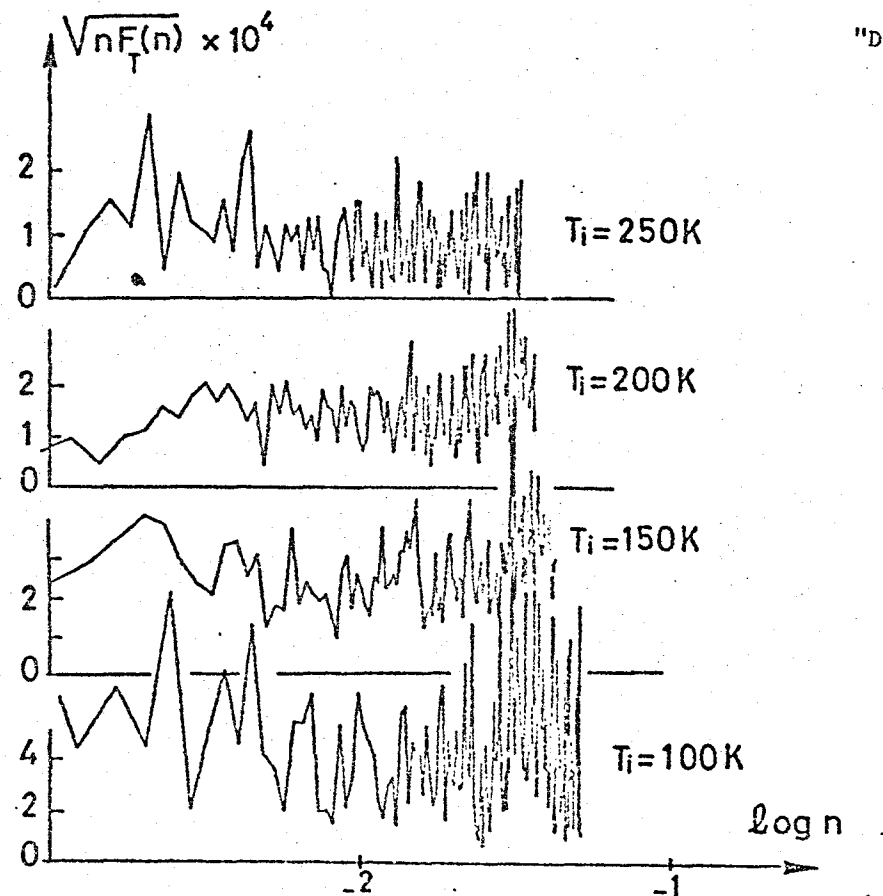


Fig. 20: Summary of the temperature fluctuation spectra measured using the cold wire ( $\phi = 9 \mu$ ) at generating temperatures of 120 K, 150 K, and 295 K, at  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars.



"DISA" cold wire "DISA"  $\phi 9\mu$

$M = 0,83$

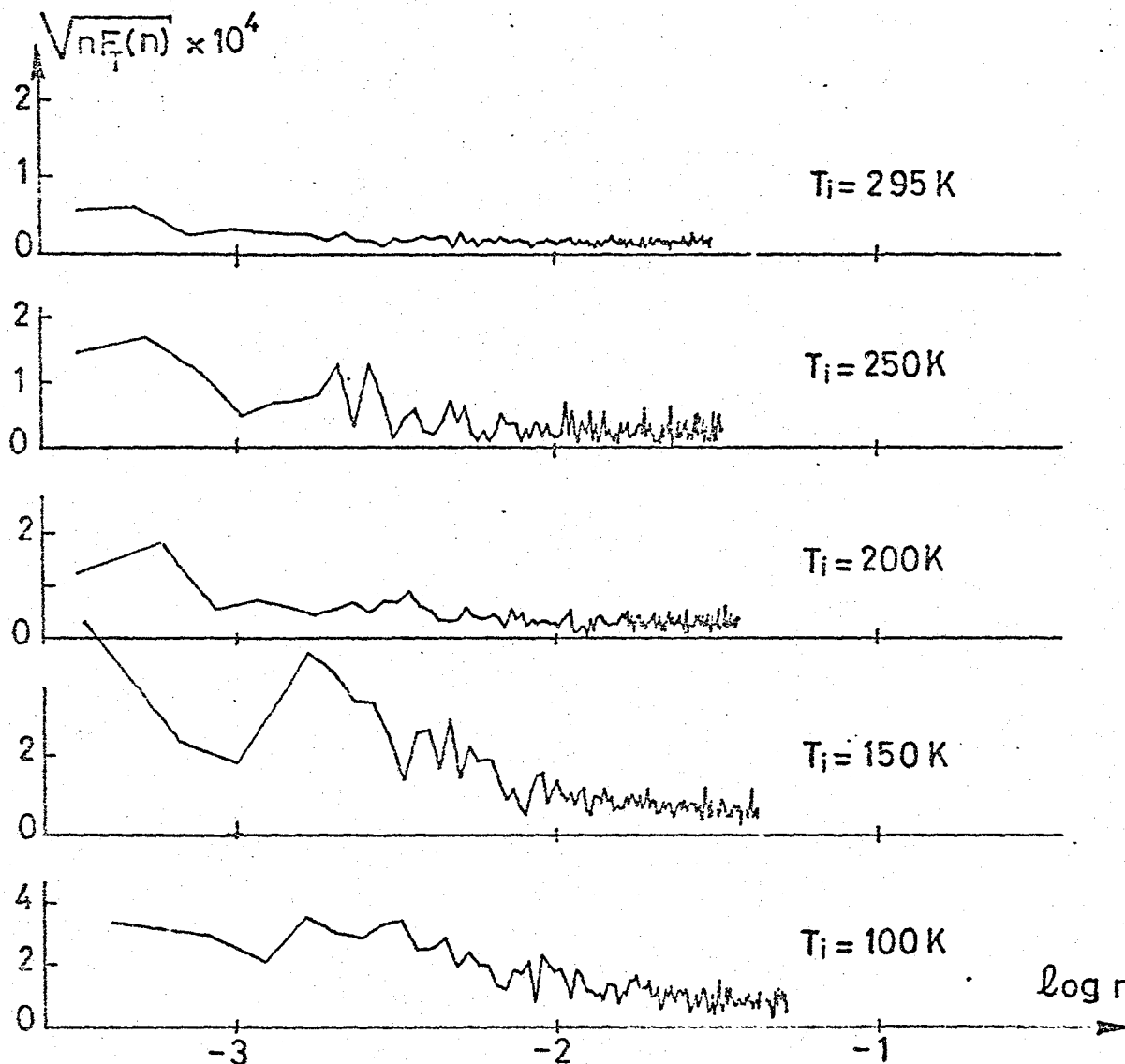
$P_i = 2 \text{ bars}$

Acquisition at 43,5 pts/s

$$n = \frac{f \cdot h}{u}$$

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

Fig. 21: Examples of temperature fluctuation spectra measured at low frequency by the cold wire, at various temperature levels, at  $M = 0.83$  and  $P_i = 2 \text{ bars}$ .



$M = 0,83$

$P_i = 2 \text{ bars}$

$T_i$ : thermocouple in  
the chamber

Acquisition at 43,5 pts/s

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

$$n = \frac{f \cdot h}{u}$$

Fig. 22: Examples of temperature fluctuation spectra obtained at low frequency with the thermocouple sounding line measuring  $T_i$  in the settling chamber, at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  and at various temperature levels.

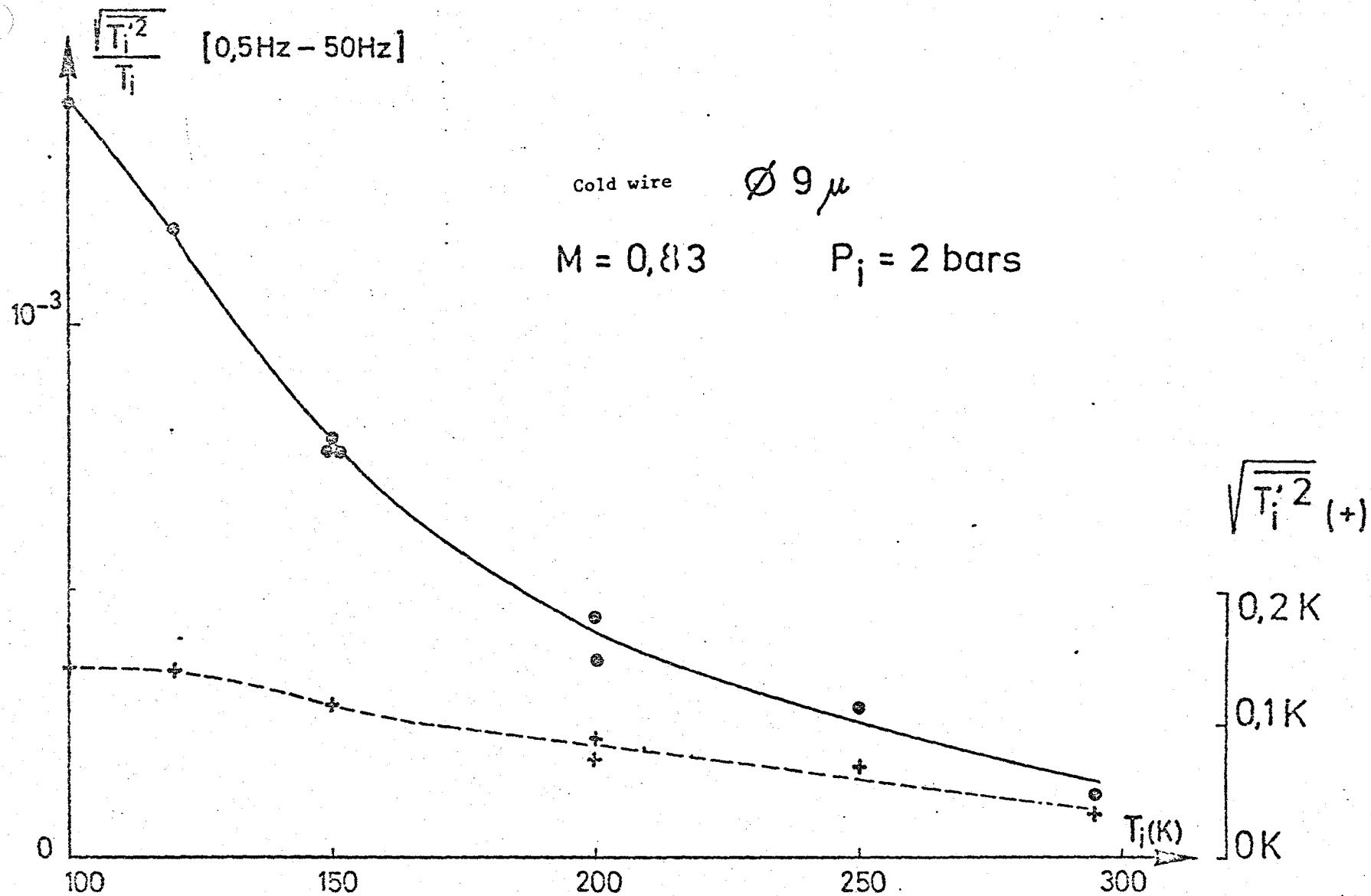


Fig. 23: Change of the average quadratic temperature fluctuation level, in relative and absolute value, as a function of the test temperature, at  $M = 0.83$  and  $P_i = 2$  bars.

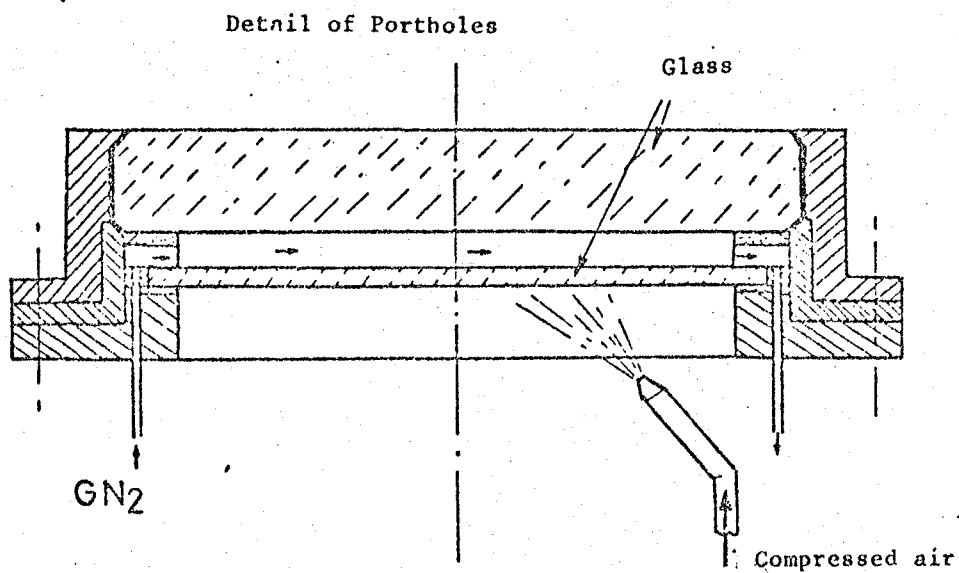
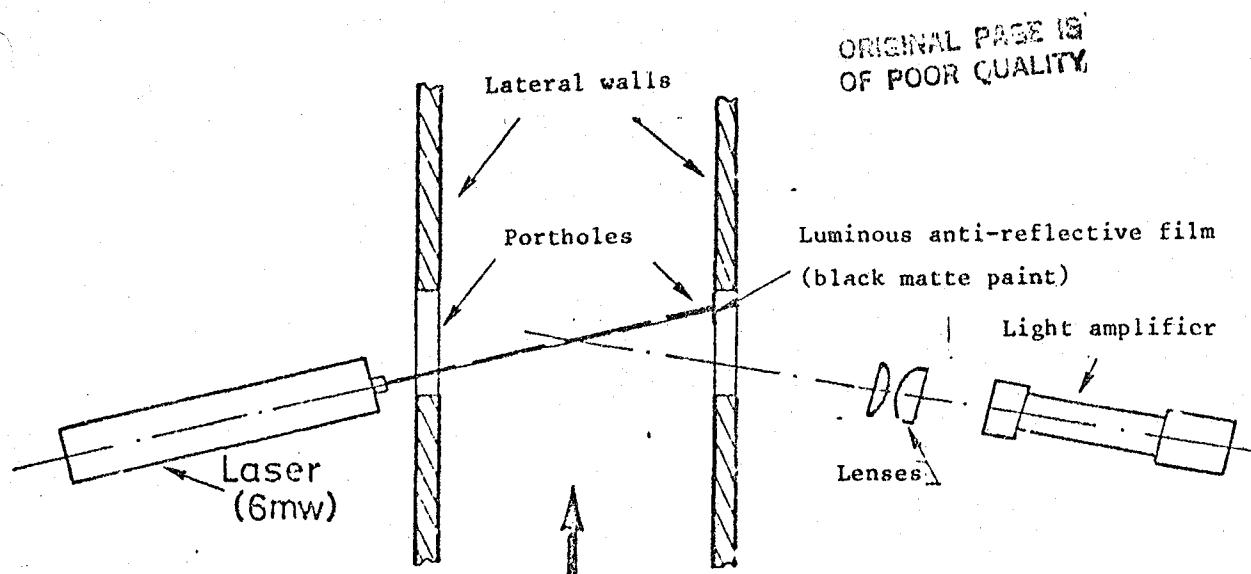


Fig. 24: Diagram of the optical particle detection apparatus.



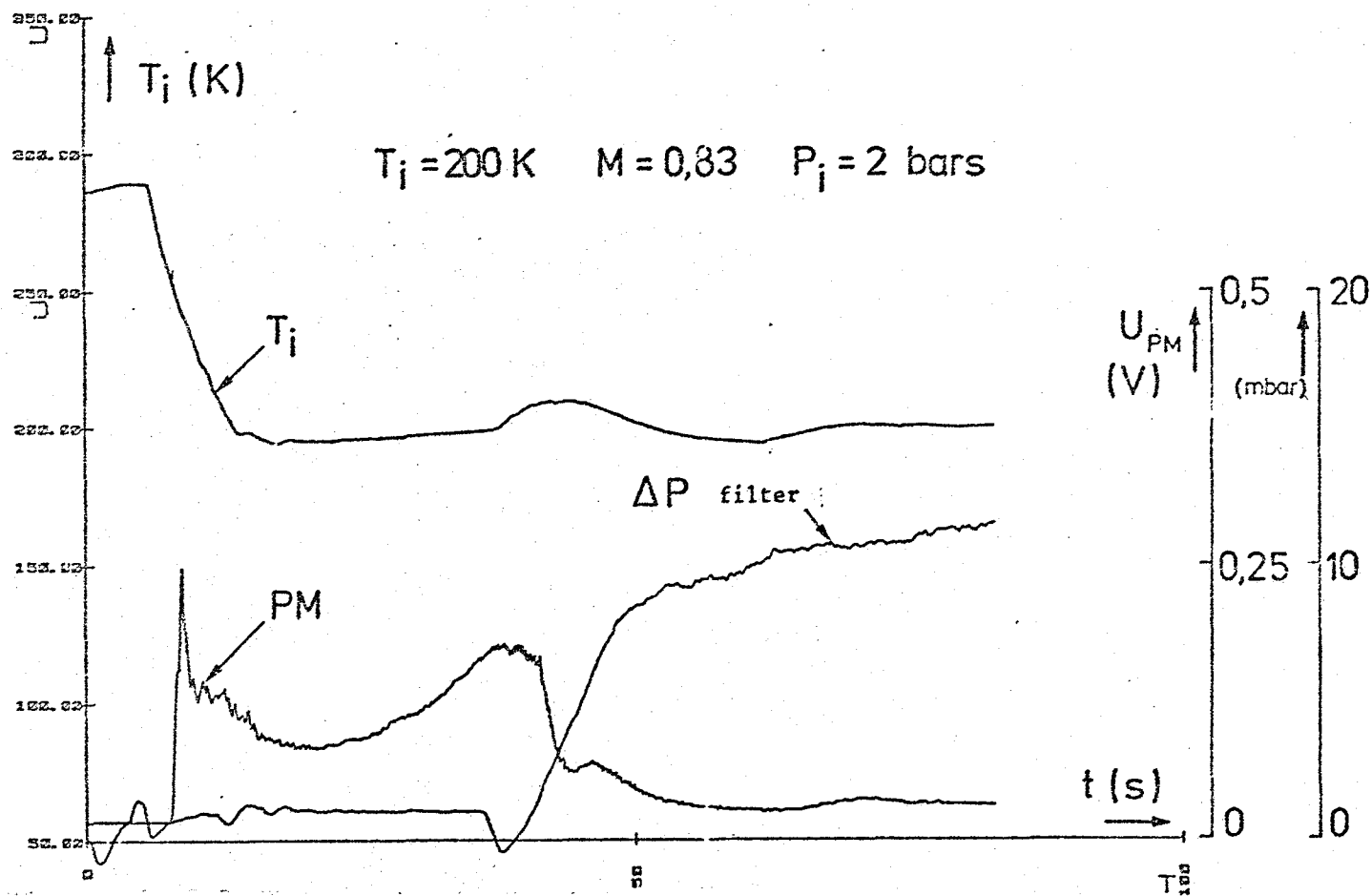


Fig. 26: Change, as a function of time, in the generating temperature of the flow, the charge loss of the anti-dust filter in the chamber, and the light amplifier signal during a cryogenic gust at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars, and  $T_i = 200 \text{ K}$ .



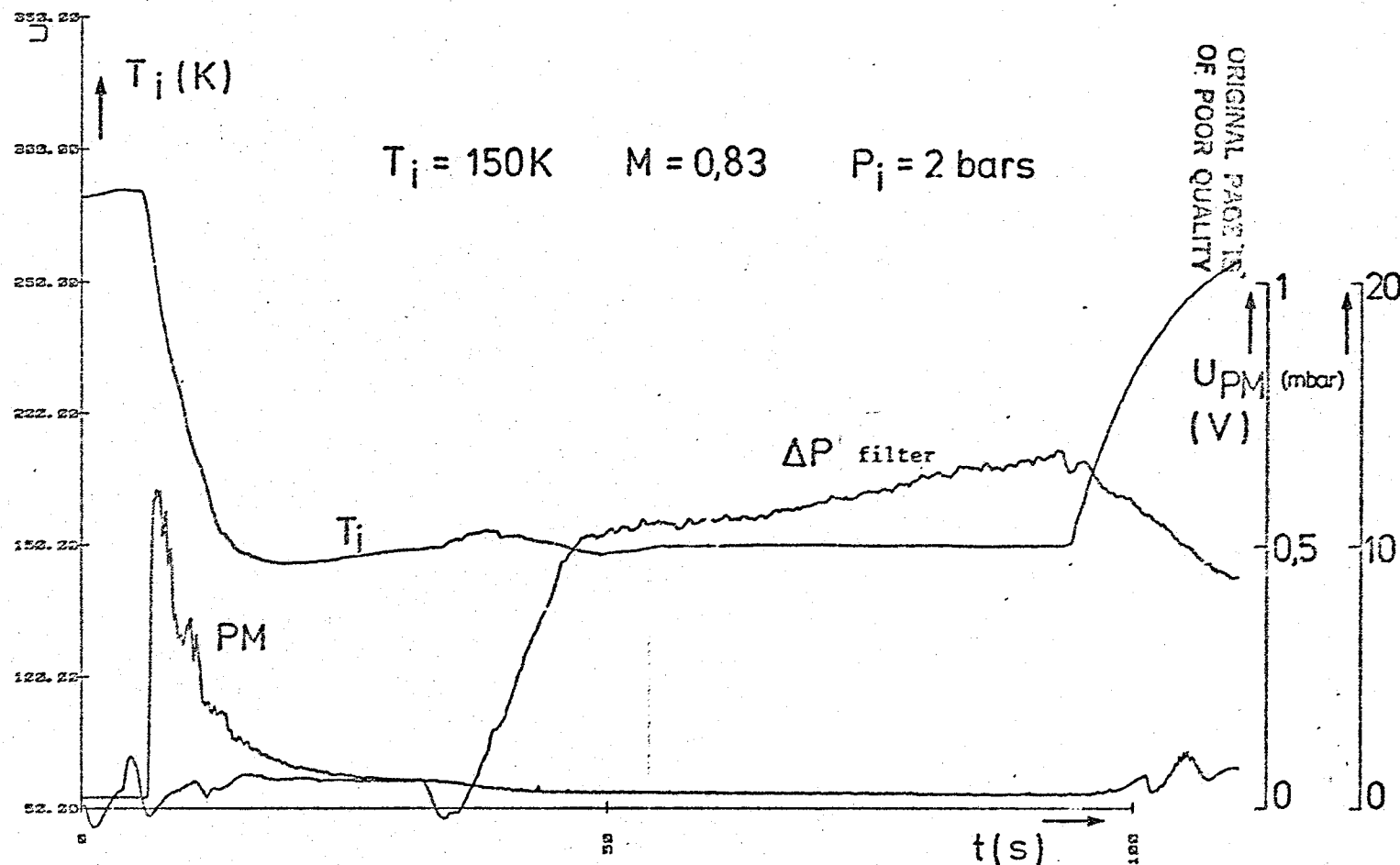


Fig. 27: Change, as a function of time, in the generating temperature of the flow, the charge loss of the anti-dust filter in the chamber, and the light amplifier signal during a cryogenic gust at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2\text{ bars}$ , and  $T_i = 150\text{ K}$ .

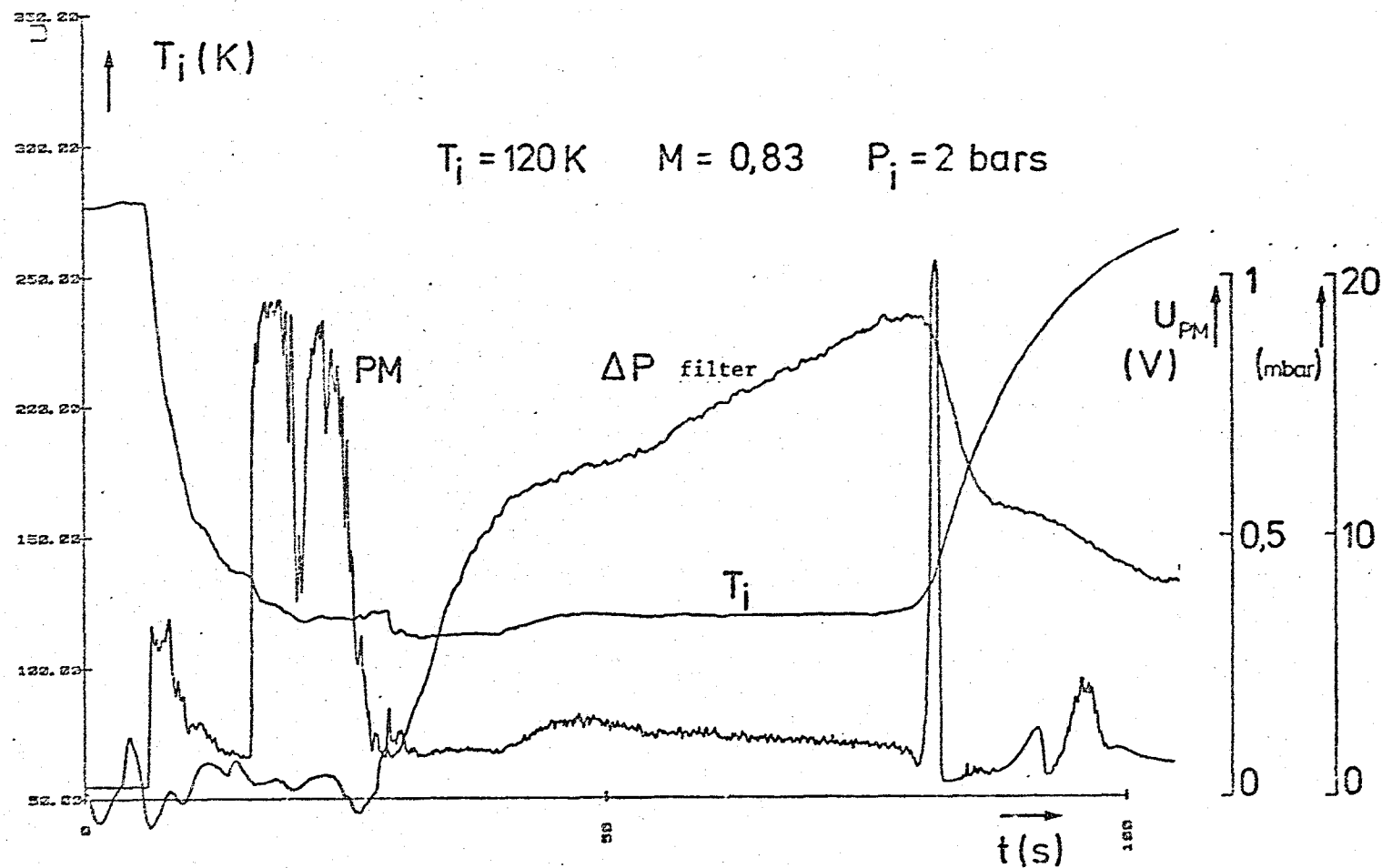


Fig. 28: Change, as a function of time, in the generating temperature of the flow, the charge loss of the anti-dust filter in the chamber, and the light amplifier signal during a cryogenic gust at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars, and  $T_i = 120 \text{ K}$ .

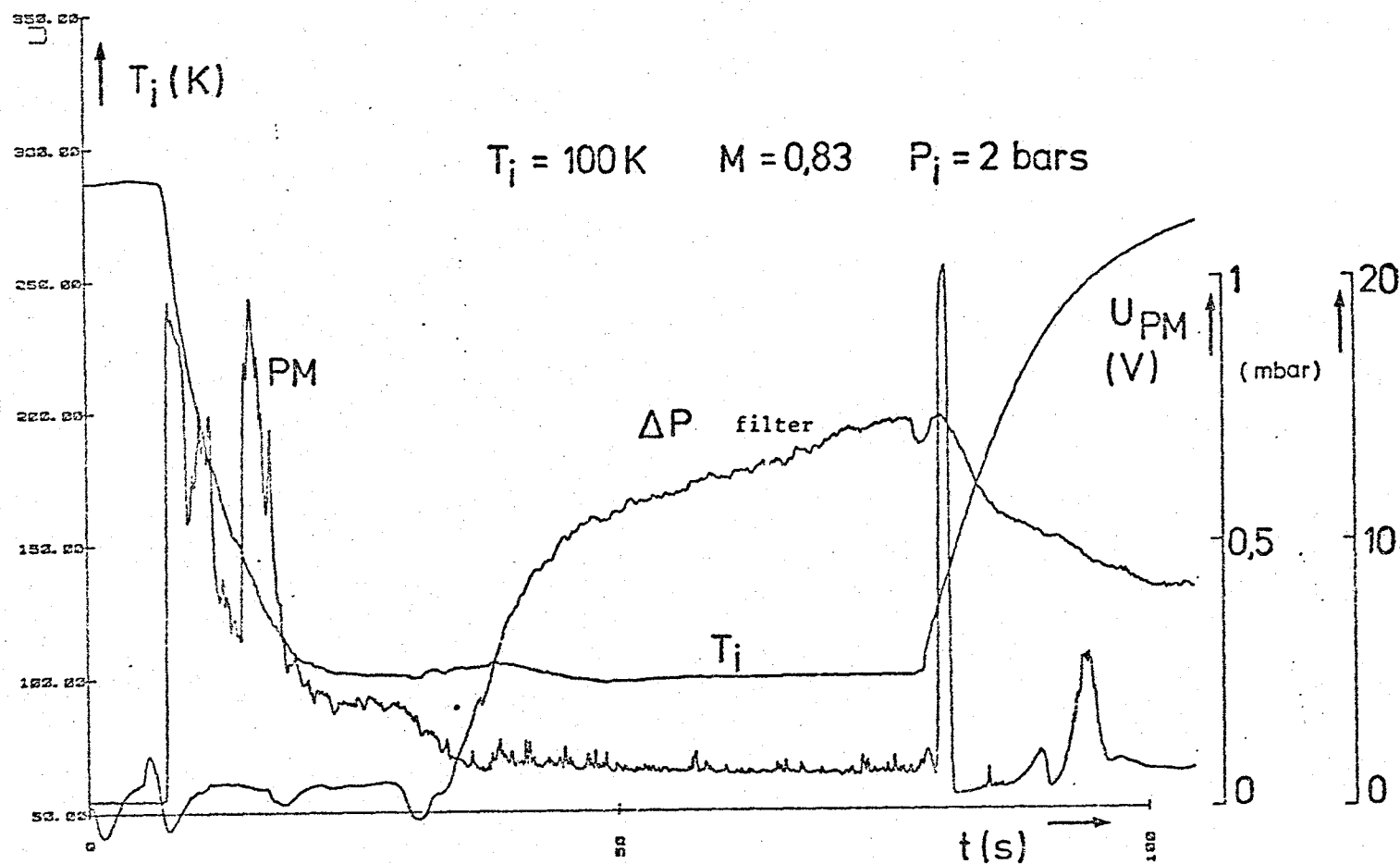


Fig. 29: Change, as a function of time, in the generating temperature of the flow, the charge loss of the anti-dust filter in the chamber, and the light amplifier signal during a cryogenic gust at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2$  bars, and  $T_i = 100 \text{ K}$ .

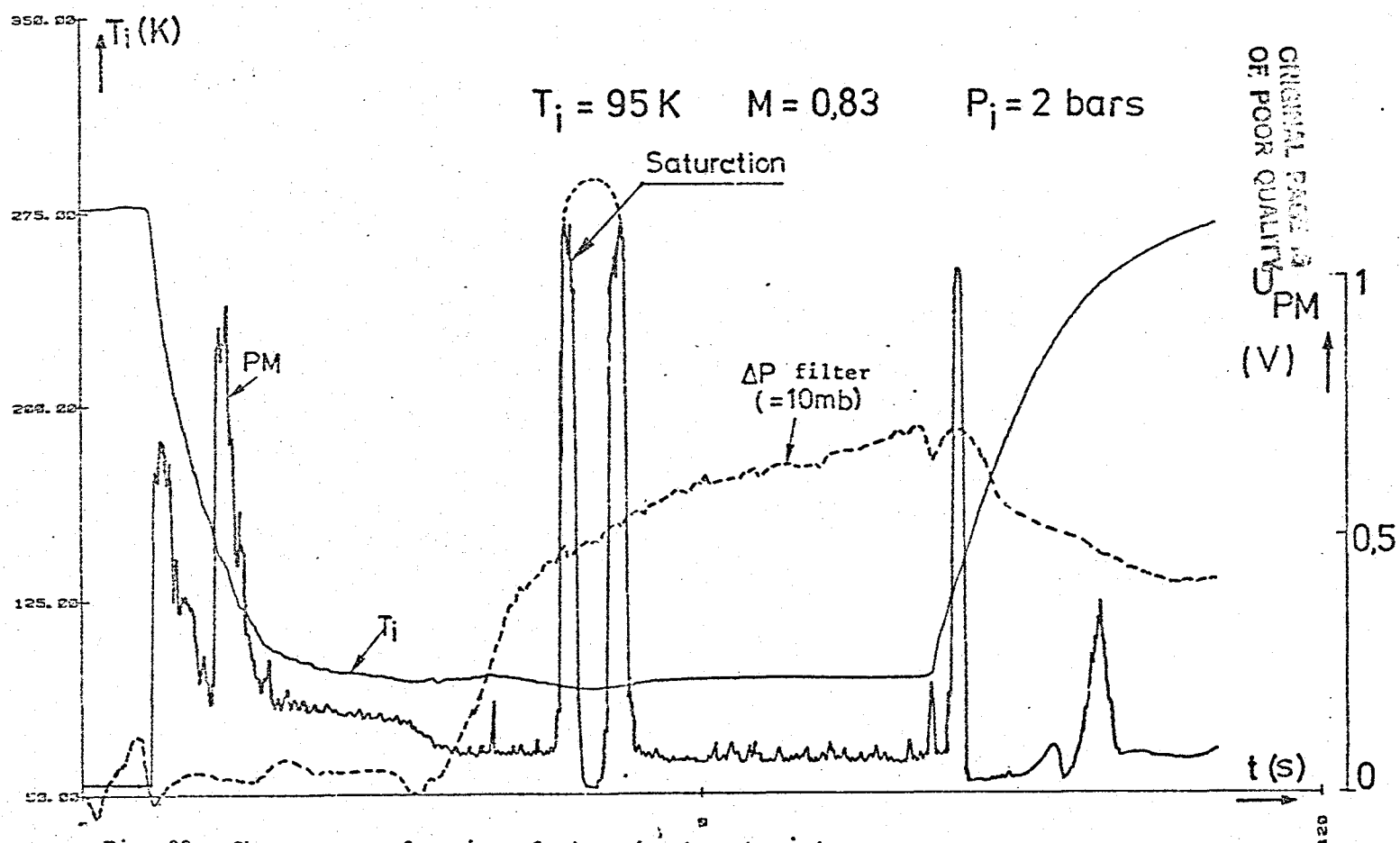


Fig. 30: Change, as a function of time, in the generating temperature of the flow, the charge loss of the anti-dust filter in the chamber, and the light amplifier signal during a cryogenic gust at  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$ , and  $T_i = 95 \text{ K}$ .

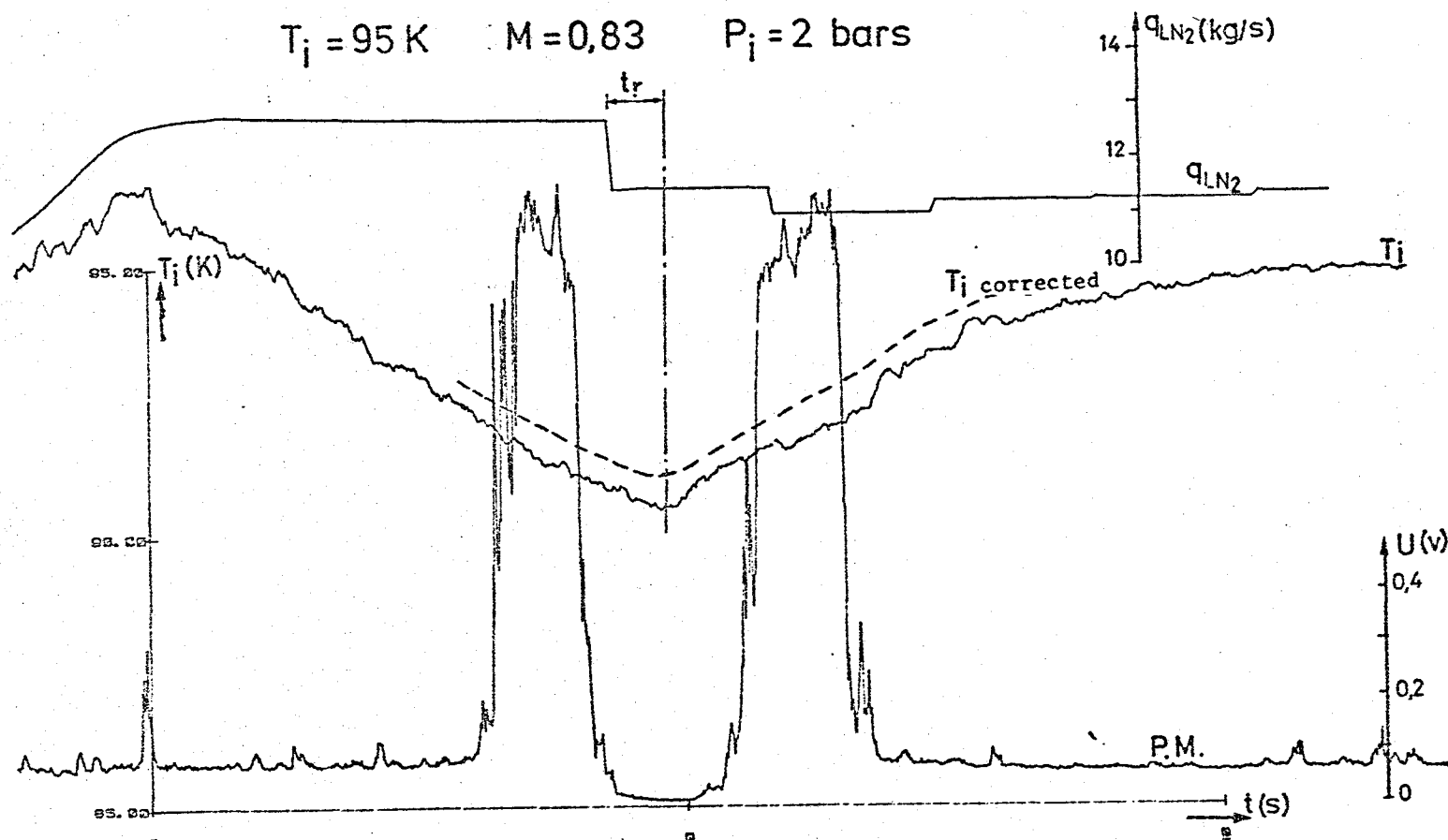


Fig. 31: Large-scale representation of the change in generating temperature of the flow and of the injected liquid nitrogen flow, while detecting a significant passage of particles at low temperature, during the test at  $T_i = 95 \text{ K}$ ,  $M = 0.83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$ .

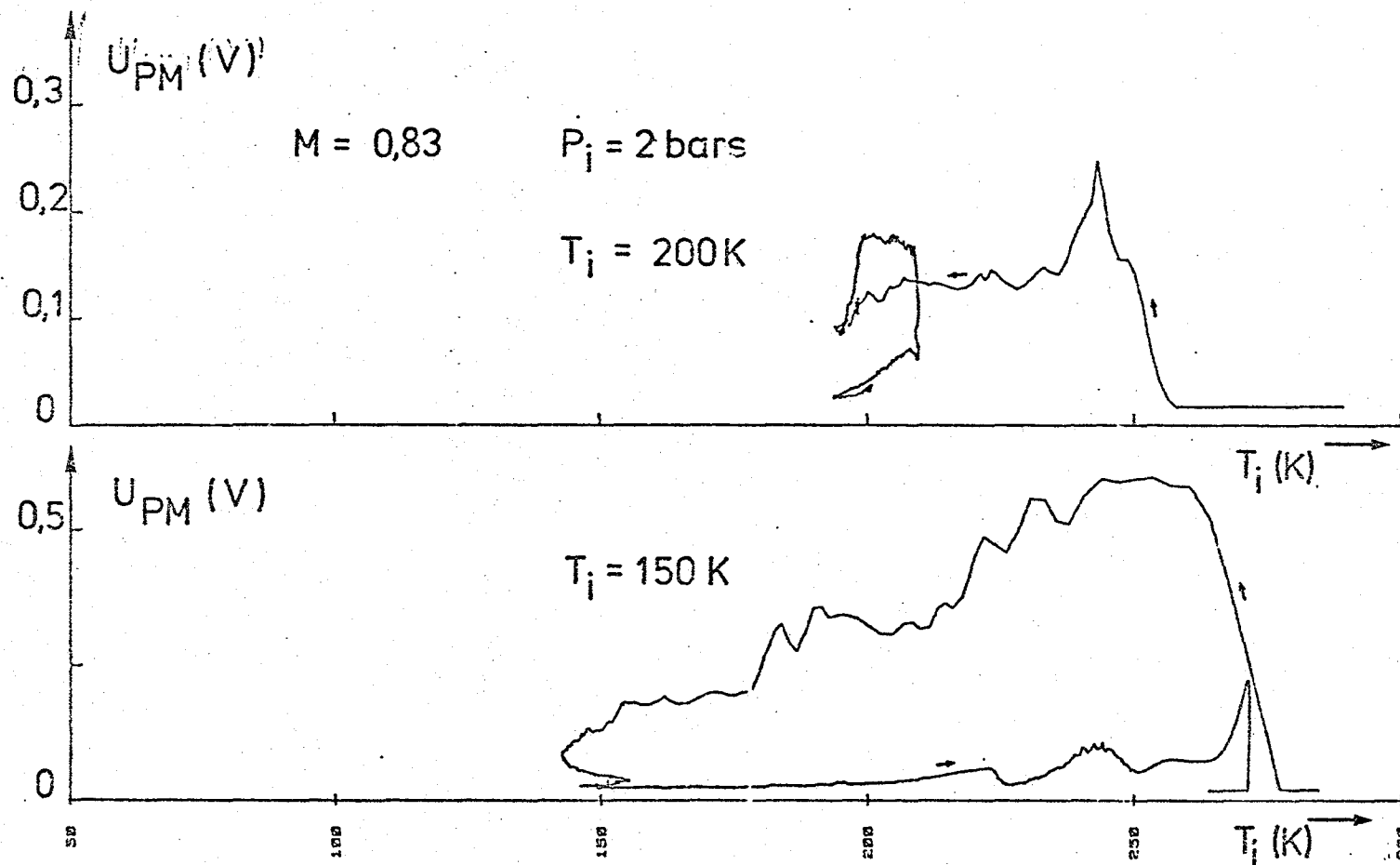


Fig. 32: Representation of the light amplifier indication as a function of the instantaneous generating temperature of the flow, for tests at  $T_i = 95 \text{ K}$ ,  $M = 0.83$ , and  $P_i = 2 \text{ bars}$ .

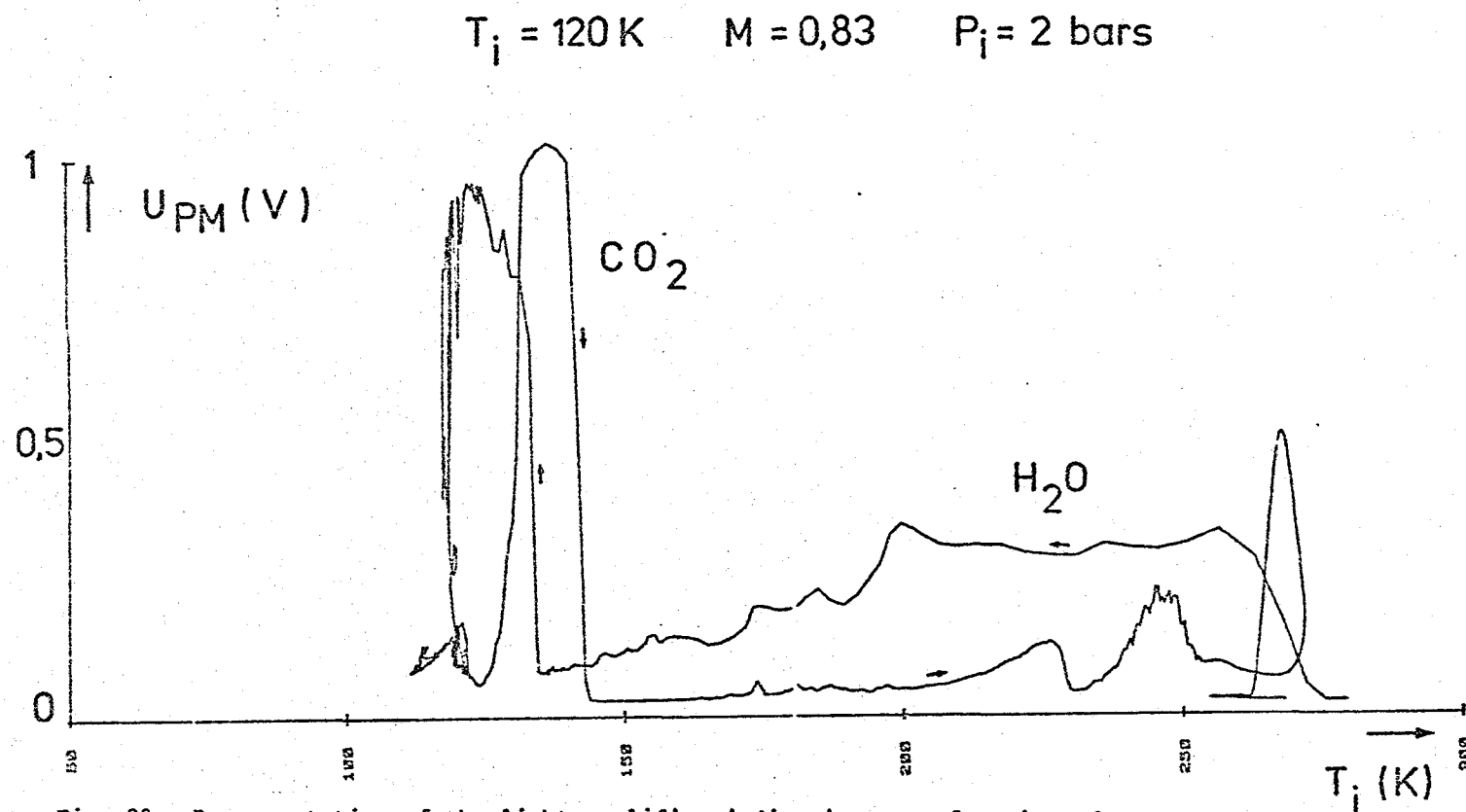


Fig. 33: Representation of the light amplifier indication as a function of the instantaneous generating temperature of the flow, for tests at  $T_i = 120 \text{ K}$ ,  $M = 0.83$ , and  $P_i = 2 \text{ bars}$ .

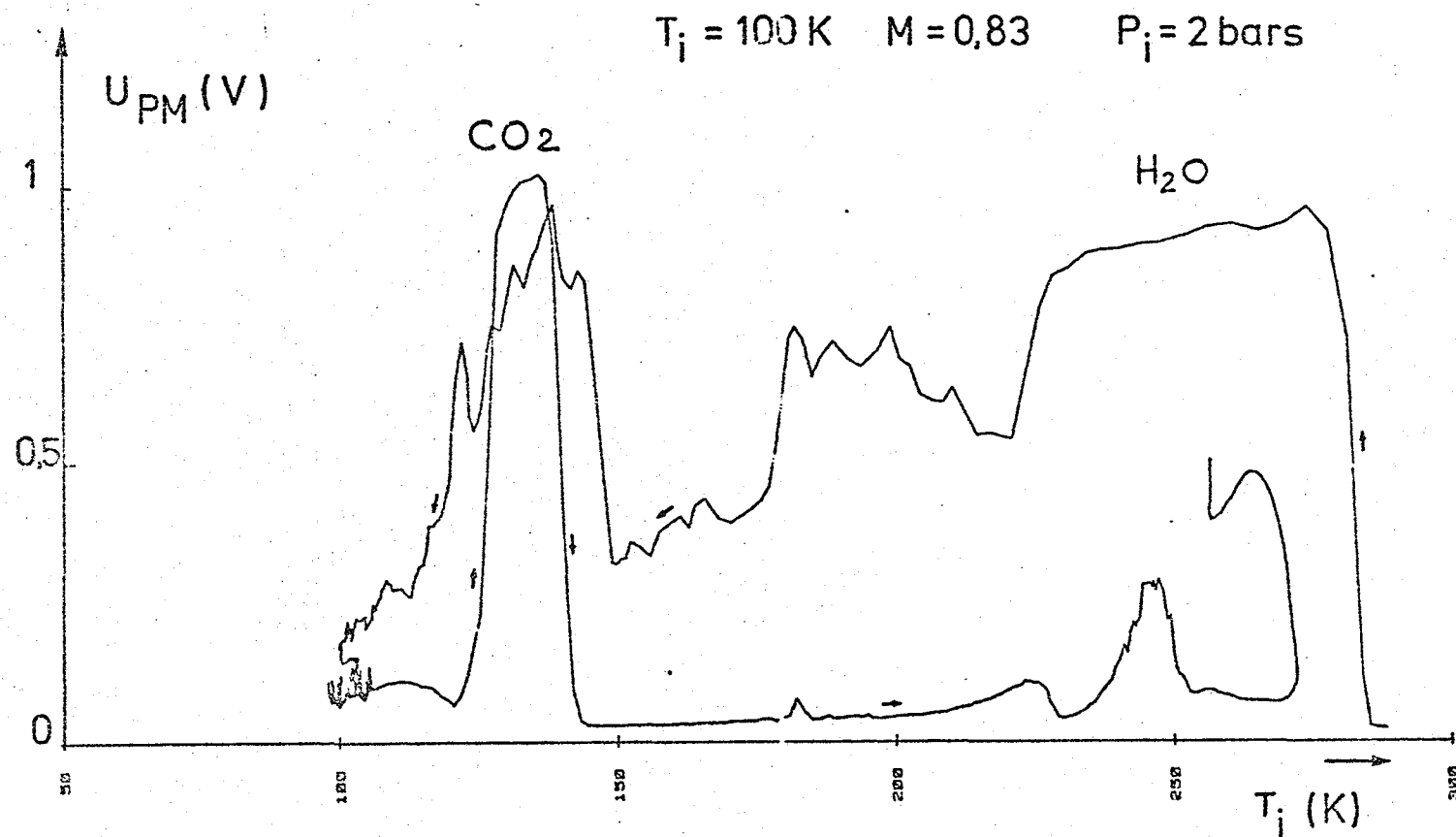


Fig. 34: Representation of the light amplifier indication as a function of the instantaneous generating temperature of the flow, for tests at  $T_i = 100 \text{ K}$ ,  $M = 0.83$ , and  $P_i = 2 \text{ bars}$ .



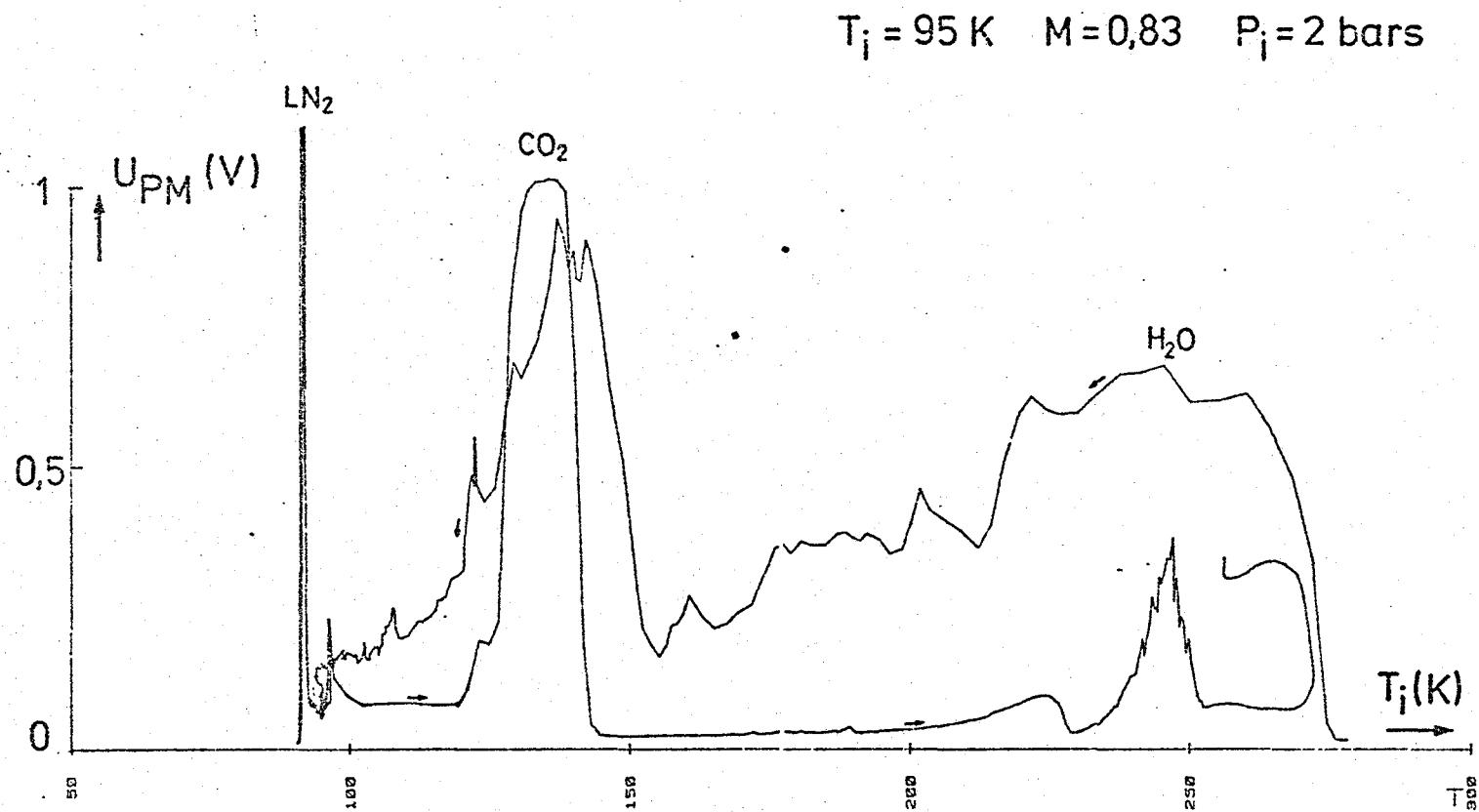


Fig. 35: Representation of the light amplifier indication as a function of the instantaneous generating temperature of the flow, for tests at  $T_i = 95 \text{ K}$ ,  $M = 0,83$ , and  $P_i = 2 \text{ bars}$ .

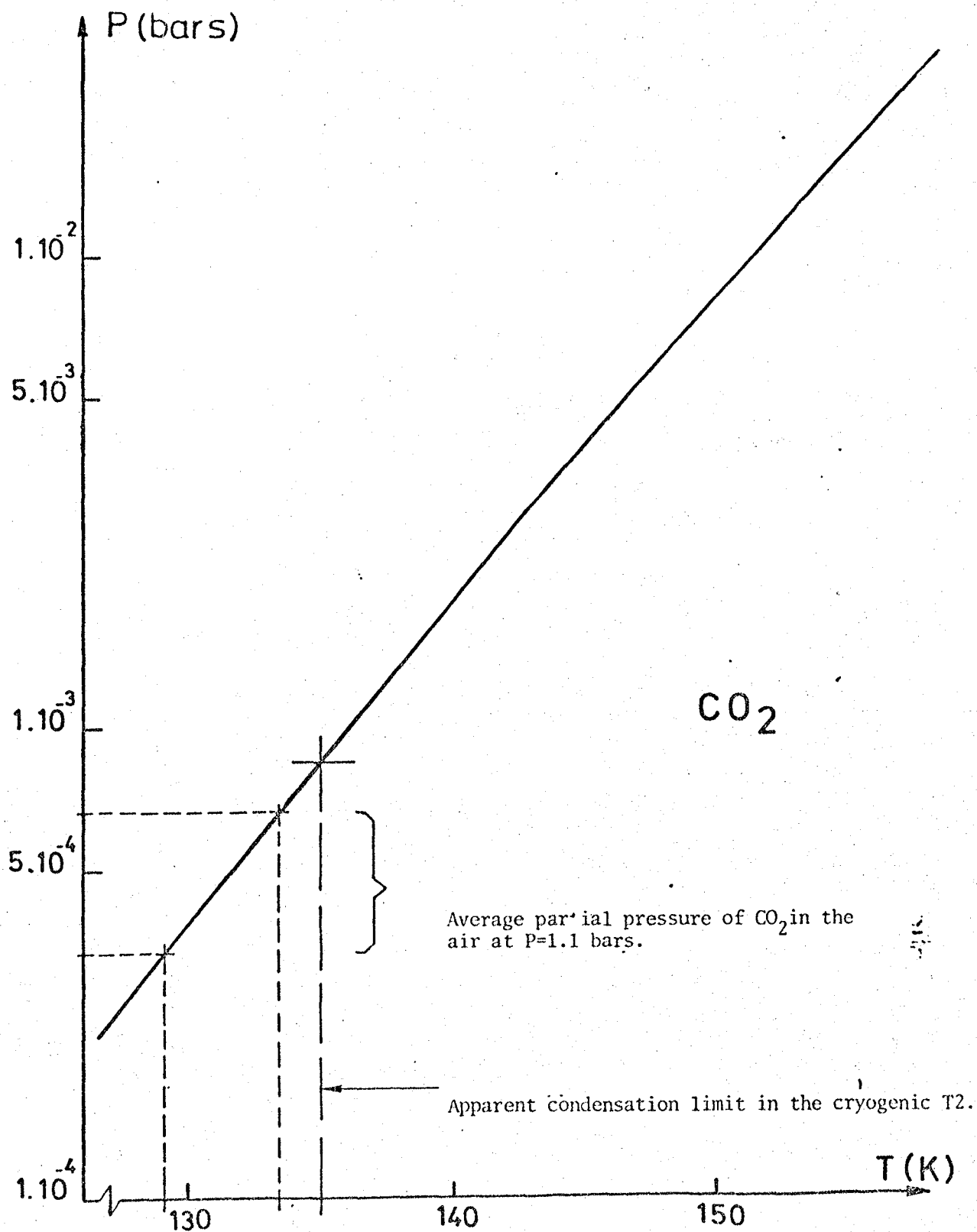


Fig. 36. Vapor-solid equilibrium curve for carbonic gas at lower pressures in the  $(P, T)$  diagram.

Erratum:

The points shown on the diagrams 37, 38 and 39 are not experimental points. They correspond with exact values of the liquid vapor equilibrium for nitrogen, oxygen and air. Only the point marked "Experimental Point" on figure 39 corresponds to a condensation phenomenon as shown by experiments on the T2 wind tunnel.

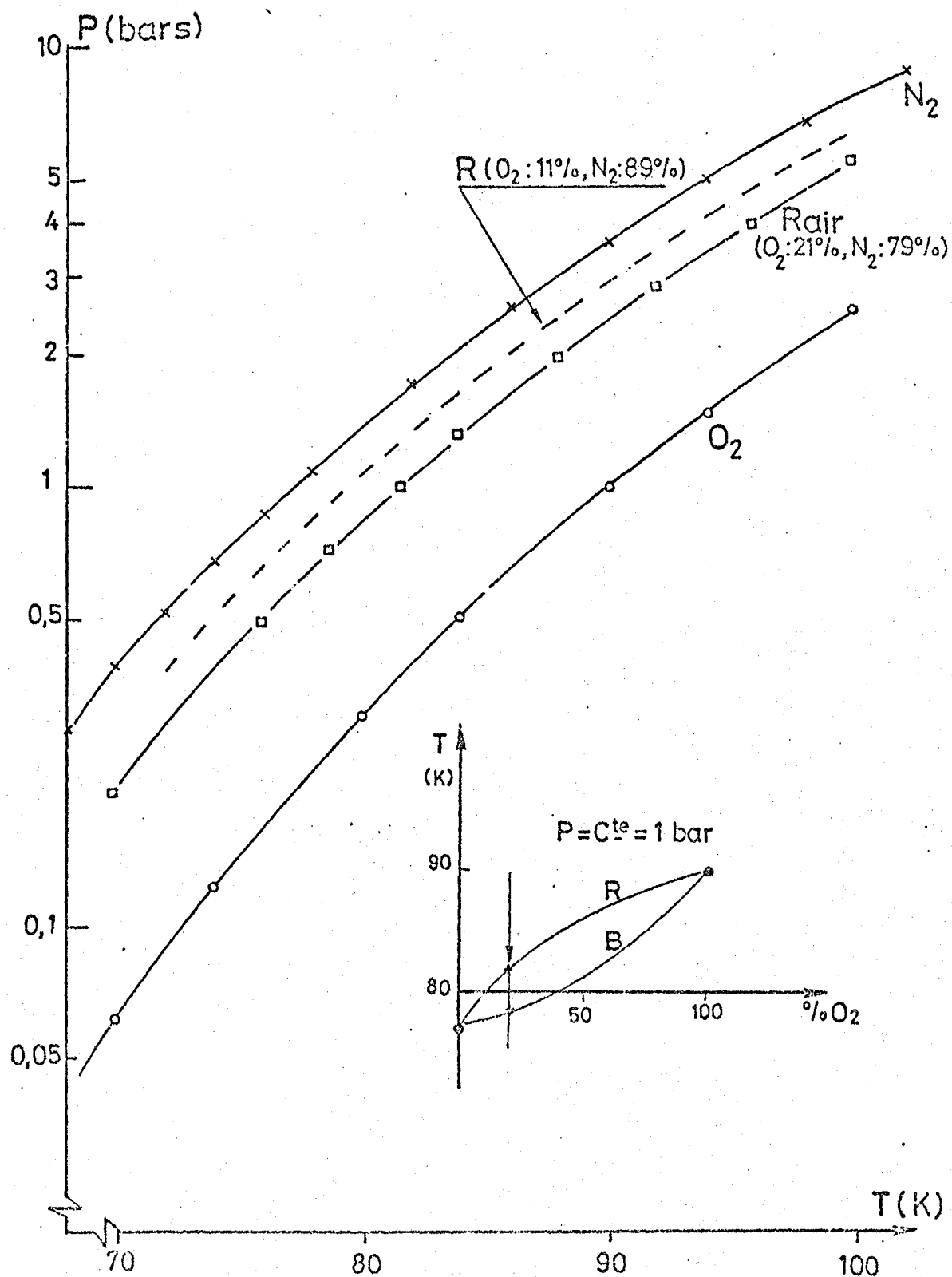


Fig. 37: Moisture curves for oxygen-nitrogen mixtures in the diagram  $(P, T)$ .

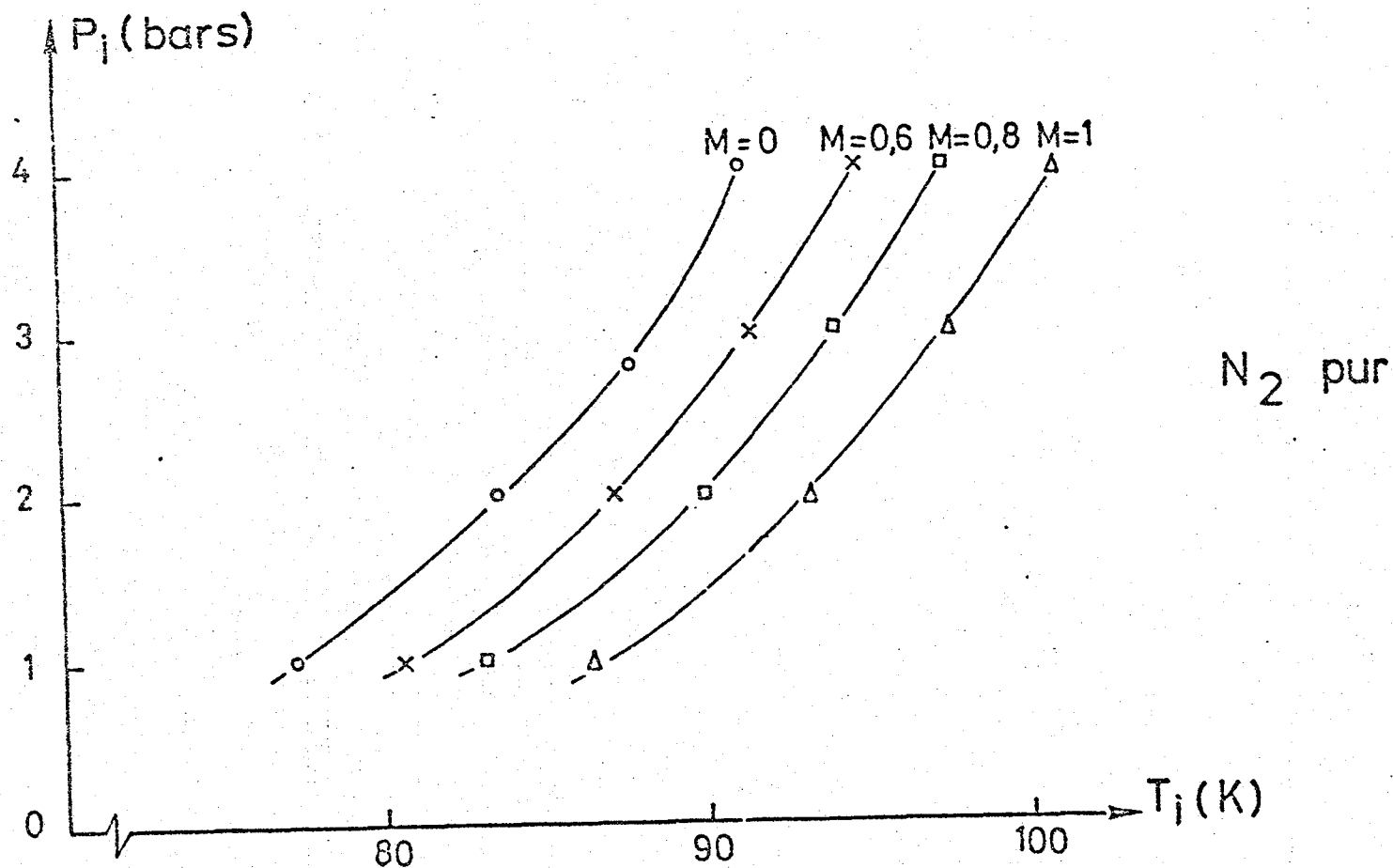


Fig. 38: Condensation curves for pure nitrogen flow in the working section, as a function of the test parameters: parameter representation following  $M$  in the drawing ( $P_i$ ,  $T_i$ ).

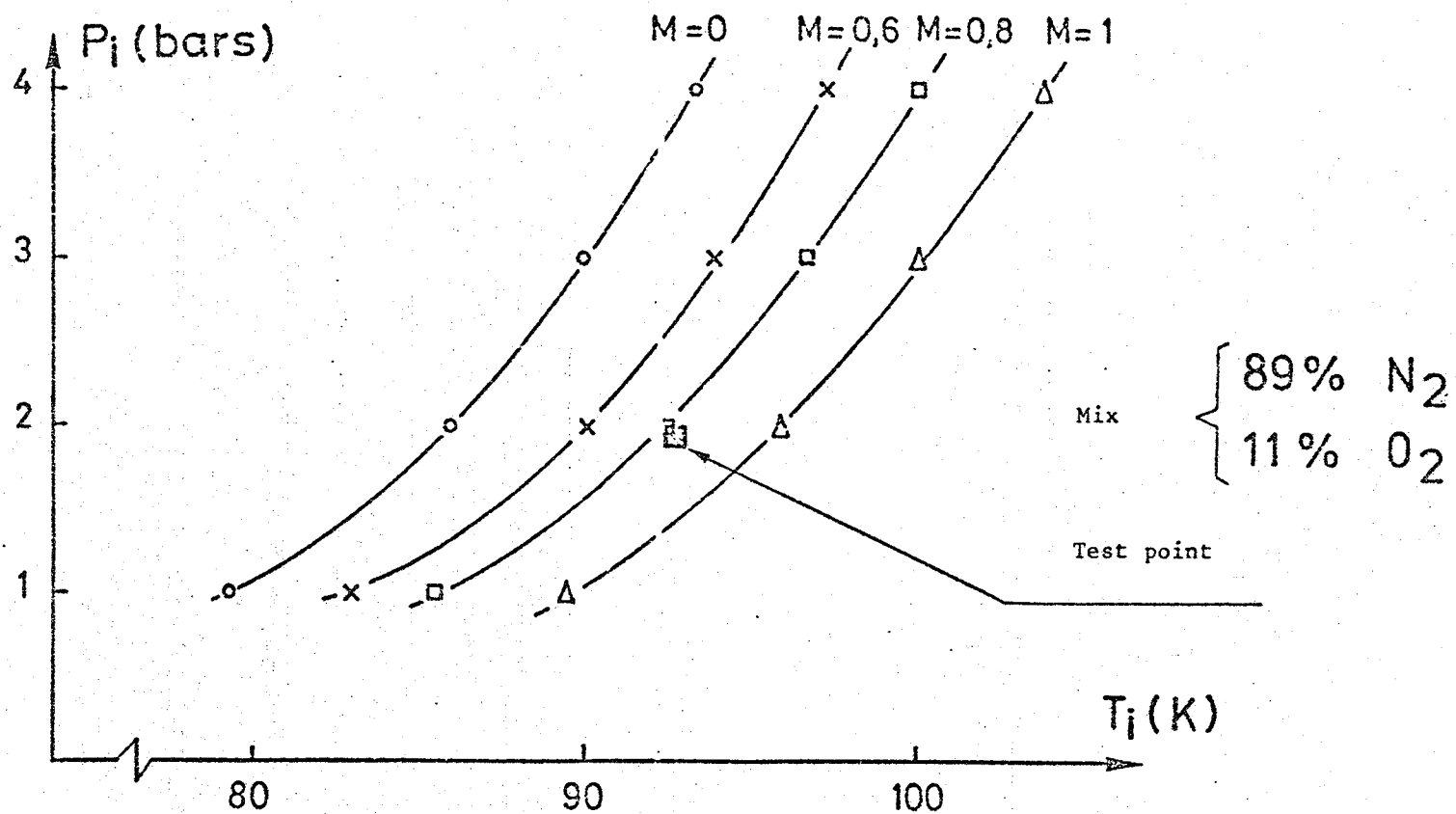


Fig. 39: Moisture curves for nitrogen-air mixture (89%  $N_2$  - 11%  $O_2$ ) in the working section, as a function of the flow parameters ( $M$ ,  $P_i$ ,  $T_i$ ).

**END  
DATE  
FILMED**

**JUN 25 1985**

O.N.E.R.A.

CENTRE D'ETUDES ET DE RECHERCHES DE TOULOUSE  
2, Avenue Edouard Belin - 31055 TOULOUSE CEDEX  
B.P. 4025 - TELEPHONE: (61) 55 71 11

DEPARTEMENT D'ETUDES ET DE RECHERCHES EN  
AEROTHERMODYNAMIQUE

LIBRARY COPY

APR 30 1985


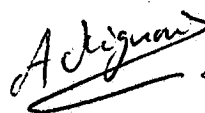
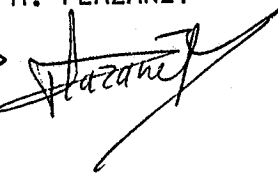
LANGLEY RESEARCH CENTER  
LIBRARY, NASA  
HAMPTON, VIRGINIA

Rapport Technique OA n° 25/5006 AND (DERAT n° 25/5006 DN) - Sept. 1983 <sup>TM-77782</sup>

QUALIFICATION DE LA SOUFFLERIE T2 EN FONCTIONNEMENT CRYOGENIQUE.

B) Fluctuations de l'écoulement - Détection et qualification de particules.

J.B. DOR, A. MIGNOSI, M. PLAZANET

Le Chef du D.E.R.A.T.

  
R. MICHEL

FOR TRANSLATION  
SEE: NASA-TM-  
77782  
N-155,267





FICHE D'IDENTIFICATION

<b>ORGANISME EMETTEUR</b>  <b>O.N.E.R.A.</b> <b>CENTRE D'ETUDES ET DE RECHERCHES</b> <b>DE TOULOUSE</b> <b>C.E.R.T.</b> <b>COMPLEXE AEROSPATIAL</b> 2. avenue Edouard-Belin <b>TOULOUSE</b> B.P. N° 40-25 - 31035 Toulouse Cedex		<b>CLASSIFICATION</b>						
		Secret militaire		Secret industriel				
		Titre : NC Fiche : NC Document : NC		NON CLASSIFIE INDUSTRIE				
		Numéro de la fiche programme  A 501 H (T 114 A)		Service de l'Etat chargé de l'exécution du contrat  /				
Département : AEROTHERMODYNAMIQUE				Numéro du contrat  /				
<b>TITRE :</b> QUALIFICATION DE LA SOUFFLERIE T2 EN FONCTIONNEMENT CRYOGENIQUE B) Fluctuations de l'écoulement - Détection et qualification de particules								
<b>AUTEUR (S):</b> (personne physique) Jean-bernard DOR, André MIGNOSI, Michel PLAZANET (DERAT n° 25/5006 DN)								
<b>DATE</b>  Septembre 1983	<b>N° D ORIGINE du DOCUMENT</b>  R.T. OA.n° 25/5006 AND	<b>Pages</b>  42	<b>NOMBRE</b> <table border="1"> <tr> <td><b>Figures</b></td> <td><b>Réf. bibliographiques</b></td> </tr> <tr> <td>39 PL.</td> <td>13</td> </tr> </table>		<b>Figures</b>	<b>Réf. bibliographiques</b>	39 PL.	13
<b>Figures</b>	<b>Réf. bibliographiques</b>							
39 PL.	13							
<b>RESUME D' AUTEUR :</b>  On présente dans cette note une partie des essais de qualification en fonctionnement cryogénique de la soufflerie transsonique à induction T2.  La première partie des résultats présentés concerne les fluctuations de pression et de température à température ambiante et en régime cryogénique.  Dans la seconde partie, on présente les phénomènes de condensation qui ont pu être mis en évidence dans l'écoulement cryogénique grâce à un système optique de détection des particules, au niveau de la veine d'essai.								
<b>NOTIONS D'INDEXAGE :</b> Souffleries cryogéniques à rafale - Mesure et analyse des fluctuations de pression et de température - Phénomènes de condensation dans un écoulement froid.								

## LISTE DE DIFFUSION

du document C.E.R.T. n° 25 / 5006 DN  
OA n° 25 / 5006 AND

---

● Destinataires du document et de la fiche d'identification :

— Extérieurs à l'O.N.E.R.A. :

ETW : M. HARTZUIKER, M. PRIEUR .....	2 ex
CEDOCAR .....	1 ex

— Intérieurs à l'O.N.E.R.A. :

M. CARRIERE .....	1 ex
OA : M. CAPELIER, M. VIVIAND, M. COSTES, M. THIBERT, M. CHEVALLIER, M. BETREMIEUX, M. DAVEU, M. SUGNOT .....	8 ex
GME : M. DOREY, M. CHRISTOPHE, M. BAZIN, M. PACI, M. PERRIAUX, M. FRANCOIS .....	6 ex
CERT / D .....	1 ex
CERT/PCE .....	1 ex
CERT/DERAT .....	4 ex
Bibliothèque .....	7 ex

● Destinataires de la fiche d'identification seule :

— Extérieurs à l'O.N.E.R.A. :

DRET/DS  
ENSAE/DE

— Intérieurs à l'O.N.E.R.A. :

OA - AT/OA - CERT/DERA - DERI - DERMES - DERMO - DERO - DERTS

TABLE DES MATIERES

=====

	<u>Pages</u>
<u>INTRODUCTION</u> .....	7
 1 - <u>PRESENTATION DE L'INSTALLATION</u> .....	 8
1.1. Caractéristiques générales de la soufflerie T2 .....	8
1.2. Contrôle et servitude .....	11
1.2.1. Paramètres de contrôle de la soufflerie .....	11
1.2.2. Alimentation et contrôle de l'injection d'air moteur .....	12
1.2.3. Alimentation et contrôle de l'injection d'azote liquide .....	12
1.2.4. Contrôle du débit évacué .....	13
1.2.5. Système numérique de commande et d'acquisition .....	13
1.2.6. Déroulement d'une rafale cryogénique .....	15
 2 - <u>ETUDE DES FLUCTUATIONS DE PRESSION ET DE TEMPERATURE DE L'ECOULEMENT</u> .....	 17
2.1. Instrumentation et traitement des mesures .....	17
2.1.1. Mesure des pressions .....	17
2.1.2. Mesure des températures .....	19
2.1.3. Acquisition et traitement des mesures .....	20

	<u>Pages</u>
2.2. Fluctuations de pression .....	22
2.2.1. Première étude à basse fréquence .....	22
2.2.2. Détermination des spectres de fluctuation sur une large bande de fréquence .....	22
2.3. Fluctuations de température .....	23
3 - <u>DETECTION DE PARTICULES DANS L'ECOULEMENT CRYOGENIQUE</u> ..	25
3.1. Dispositif optique de détection des particules .....	26
3.2. Présentation des essais et des planches .....	26
3.3. Résultats .....	28
3.3.1. Glace .....	28
3.3.2. Neige carbonique .....	29
3.3.3. Condensation du fluide dans la veine d'essai.	30
3.3.4. Remarques complémentaires .....	31
4 - <u>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</u> .....	35
<u>REFERENCES</u> .....	36
<u>LISTE DES PLANCHES</u> (P.J. : 39) .....	38

## INTRODUCTION

On présente dans cette note et dans celle intitulée "Champ thermique. Etude préliminaire d'une maquette schématique", les principaux résultats obtenus à la soufflerie transsonique à induction T2, en fonctionnement cryogénique, au cours d'une campagne d'essais effectuée en Septembre et Octobre 1982.

Le but de ces essais sans maquette est la qualification de l'installation en ce qui concerne la réalisation d'une rafale cryogénique d'une part et l'analyse des qualités de l'écoulement froid d'autre part. La phase suivante, prévue pour l'année 1983, comporte la maîtrise de la réalisation de rafales cryogéniques avec maquette prérefroidie et l'obtention de mesures aérodynamiques destinées à valider la soufflerie cryogénique en tant que moyen d'essai à grand nombre de Reynolds.

L'étude des qualités de l'écoulement froid s'est attachée particulièrement à l'analyse des gradients thermiques dans la chambre de tranquillisation et la veine d'essai, à la qualification en niveau et en répartition spectrale des fluctuations de température et de pression et à la définition du domaine de fonctionnement vers les basses températures à l'aide d'un détecteur optique indiquant l'apparition des particules (glace, glace carbonique, gouttelettes).

La présentation des résultats de cette étude, fractionnée en deux rapports, fait suite à l'article présenté dans "La Recherche Aérospatiale" /REF. 6/ présentant la transformation de l'installation en vue d'un fonctionnement cryogénique et les premiers résultats obtenus après celle-ci, ainsi qu'à celui présenté au "ETW Cryogenic Technology Review Meeting" /REF. 8/ concernant la technique de commande et de régulation d'une rafale cryogénique.

Le présent rapport comporte, en première partie, une description générale de la soufflerie T2 de l'ONERA / CERT à TOULOUSE. Les deux parties suivantes présentent chacune, l'instrumentation, les essais et les résultats, concernant respectivement l'analyse des fluctuations de température et de pression et la détection optique de particules dans l'écoulement froid.

## 1 - PRESENTATION DE L'INSTALLATION

Des informations plus détaillées sur le fonctionnement à température ambiante et l'adaptation cryogénique de la soufflerie T2 pourront être trouvées dans les notes citées en références /1, 2, 3, 5, 6, 7, 8/.

### 1.1. Caractéristiques générales de la soufflerie

T2 est une soufflerie transsonique pressurisée dont le circuit à retour est représenté schématiquement sur la planche 1.

Une chambre de tranquillisation de section carrée  $1,8 \times 1,8 \text{ m}^2$  équipée d'un filtre anti-poussière, d'un nid d'abeille et de grillages anti-turbulents, précède un convergent de rapport de contraction égal à 20.

La veine d'essai, de section pratiquement carrée  $0,39 \times 0,37 \text{ m}^2$  comporte à sa partie aval un second col utilisé pour stabiliser l'écoulement à des nombres de Mach supérieurs à 0,6.

Un circuit de retour où plusieurs diffuseurs ramènent l'écoulement à faible vitesse, referme la soufflerie.

T2 est une soufflerie à induction, c'est à dire mue par un jet d'air inducteur à haute vitesse. L'injection d'air moteur est effectuée par les bords de fuite des sept aubes du premier coude après la veine d'essai. Chaque aube est équipée intérieurement de 14 petites tuyères, alimentées séparément en air à haute pression, ce qui permet de faire varier la section d'injection. Les aubes délivrent à leur bord de fuite des jets à  $M = 1,6$ . La partie aval du coude injecteur constitue une chambre de mélange entre l'écoulement entraîné et les sept jets pratiquement bidimensionnels.

En fonctionnement cryogénique, la mise en froid de l'écoulement est obtenue par injection directe d'azote liquide dans le circuit de retour. Un refroidissement de l'air moteur aurait pu être envisagé, mais la solution retenue, plus simple à mettre en oeuvre, a été clairement imposée par l'augmentation de l'efficacité d'une trompe lorsque la température du jet moteur devient supérieure à celle de l'écoulement entraîné. D'autre part, parmi les études suscitées par l'adaptation cryogénique de la soufflerie, des essais effectués sur l'installation pilote T'2 ont montré qu'une amélioration sensible des qualités de l'écoulement froid était obtenue en plaçant l'injection d'azote liquide

à une distance aussi grande que possible en amont de la veine d'essai. L'injection d'azote est donc effectuée de manière périphérique, normalement à l'écoulement, à la paroi d'un élément situé immédiatement en aval de la chambre de mélange de l'air moteur et du fluide entraîné.

L'évacuation nécessaire d'un débit égal au débit moteur, ou, en régime cryogénique, à la somme des débits d'air moteur et d'azote réfrigérant, est située juste en amont du coude injecteur. Cette évacuation se fait, grâce à la pressurisation de la soufflerie, à travers les parois en bronze poreux d'un canal rectangulaire, qui joue le rôle d'un premier diffuseur aérodynamique, entre la veine d'essai et le coude injecteur.

La soufflerie fonctionne par rafales dont la durée, de l'ordre de la minute, dépend dans une certaine mesure du débit moteur nécessaire pour l'essai et de la réserve d'air à haute pression disponible. D'autre part, le circuit pressurisable jusqu'à 5 bars est réalisé en acier ordinaire, métal qui devient fragile aux basses températures. Ces raisons ont conduit à l'adoption d'une isolation thermique interne, d'épaisseur relativement faible, qui rend possible la réalisation de rafales cryogéniques. La réduction des échanges thermiques à la paroi est suffisante pour obtenir pratiquement une mise en froid rapide de l'écoulement seul et une dérive en température négligeable de la carcasse métallique, pour des durées de rafale de l'ordre d'une centaine de secondes. La température de surface de l'isolant évolue aussi rapidement que celle de l'écoulement et s'établit à un niveau voisin de la température de paroi adiabatique.

De ce point de vue, les isolants les plus performants sont ceux dont la conductivité et la capacité thermiques sont faibles. Cependant d'autres problèmes importants se sont posés : l'état de surface de l'isolant, la tenue mécanique du matériau et de son collage.

Schématiquement, l'isolation interne de la soufflerie se présente de la façon suivante :

Dans les parties à basse vitesse, circuit de retour et chambre de tranquillisation, 10 mm de polyuréthane armé localement par du tissu de Kevlar. Il s'agit d'un isolant à très faibles conductivité et capacité thermiques, mais légèrement rugueux en surface.



Dans les parties à haute vitesse, veine d'essai et coude injecteur, 5 mm de liège aggloméré de type Norcoat. Il s'agit d'un isolant moins performant mais présentant un état de surface acceptable.

Certaines parties du circuit, aubes injectrices et élément d'injection d'azote liquide, ont été dotées d'une isolation particulière dont on trouvera le détail en référence 11.

Dans un double but, de mesure et de sécurité, le circuit de la soufflerie est équipé en permanence d'une centaine de thermocouples, qui permettent de connaître :

- la température de paroi interne,
- la température de la structure métallique,
- la température de l'écoulement dans la chambre de tranquillisation, grâce à une grille de 25 thermocouples.

La mesure fournie par le thermocouple central de cette grille constitue la température génératrice de référence, notée  $T_i$  sur les planches et utilisée pour la régulation.

Le domaine d'utilisation de la soufflerie T2 couvre une gamme de nombre de Mach allant du bas subsonique ( $M = 0,3$ ) au transsonique ( $M = 1$ ). La pression génératrice peut varier d'un niveau de 1,5 bars absolus à une valeur maximale de 5 bars.

En anticipant les conclusions de cette note, on peut dire que la limite du domaine de fonctionnement en température semble se situer à environ 95 K et qu'une rafale à la température génératrice de 100 K peut être réalisée sans difficulté particulière.

Les essais qui font l'objet de cette note couvrent tout le domaine de température et ont été réalisés à la pression génératrice de 2 bars absolus et à des nombres de Mach dans la veine de 0,6 ou 0,8.

Enfin la veine d'essai de T2 est équipée de parois auto-adaptables qui autorisent des dimensions relatives élevées pour des modèles bidimensionnels. Il semble que des parois semblables à celles utilisées à température ambiante et constituées d'une mince plaque métallique renforcée

par des raidisseurs transversaux, puissent être utilisées en fonctionnement cryogénique, la masse calorifique de la plaque étant suffisamment faible pour que l'écoulement la refroidisse rapidement. De telles parois, réalisées en Invar ont été fabriquées et testées et la phase suivante des essais cryogéniques avec maquette prévoit leur utilisation.

Le nombre de Reynolds donné à la planche 4 en fonction du nombre de Mach et de la pression, à température ambiante et à la température de 120 K, est formé avec la longueur de 15 cm, qui est, grâce aux parois adaptables, une valeur courante pour la corde des profils étudiés à la soufflerie T2.

Signalons également qu'un dispositif annexe de prérefroidissement pour des maquettes bidimensionnelles a été réalisé et testé /REF 13/. Avant la rafale cryogénique le profil est contenu dans une boîte de refroidissement disposée à côté de la veine et dans laquelle sa mise en température est effectuée par un courant gazeux froid à faible vitesse. Un vérin et un système de guidage et de verrouillage permettent d'introduire le profil dans la veine d'essai\* une fois que l'écoulement d'abord lancé à faible nombre de Mach, a atteint la température cryogénique de l'essai.

## 1.2. Contrôle et servitudes

Ce paragraphe décrira les équipements annexes et les éléments de contrôle de la soufflerie, ainsi que le processus de réalisation d'une rafale cryogénique.

### 1.2.1. Paramètres de contrôle de la soufflerie

Un diagramme synthétique résumant les différents éléments de la commande et du contrôle de la soufflerie, est donné à la planche 3.

Les trois paramètres du fonctionnement sont le nombre de Mach dans la veine, la pression et la température génératrices.

Le nombre de Mach est défini par la section du second col de la veine d'essai, lorsque le débit d'air moteur est suffisant pour que celui-ci soit amorcé. Signalons que ce col est motorisé et qu'une

variation de sa section peut être commandée pendant l'essai. Cependant, au cours de nos essais, où le nombre de Mach dans la veine était toujours de 0,6 ou 0,8, le col était positionné à la section correspondante, avant l'essai.

Pour contrôler la pression, la température et éventuellement le nombre de Mach, on agit sur les trois paramètres suivants :

- débit d'air moteur,
- débit d'azote liquide,
- débit évacué.

#### 1.2.2. Alimentation et contrôle de l'injection d'air moteur.

Un compresseur alimente sous une pression de 80 bars un réservoir de 45 m<sup>3</sup> qui stocke l'air comprimé destiné à l'injection. Ce réservoir dessert par l'intermédiaire d'un détendeur, un réchauffeur à eau, où la pression est de l'ordre de 20 bars : celui-ci permet de compenser la détente de l'air injecté et de maintenir sa température à une valeur proche de l'ambiante.

La soufflerie est alimentée par l'intermédiaire d'une vanne de contrôle proportionnelle, qui régule la pression dans la chambre de tranquillisation des aubes injectrices, notée P<sub>ij</sub>. On contrôle ainsi le débit moteur par la pression statique ou la densité du jet à M = 1,6.

Le système multivannes qui distribue le débit aux diverses tuyères du bord de fuite, se trouve immédiatement en amont des aubes. Au cours des essais présentés dans cette note, toutes les tuyères sont alimentées.

Signalons également qu'avant d'aboutir au réservoir de stockage, l'air comprimé passe par un dessiccateur à billes d'alumine, qui abaisse son point de rosée à -80°C, en fonctionnement optimal (§ 3.3.1.).

#### 1.2.3. Alimentation et contrôle de l'injection d'azote liquide.

La planche 3 présente un schéma du système d'alimentation en azote liquide. Un réservoir de stockage de 20 m<sup>3</sup> alimente un réservoir d'essai de 2 m<sup>3</sup>, pressurisable jusqu'à 18 bars, qui dessert les injecteurs sur la soufflerie.

Au cours de nos essais, le gaz de pressurisation du réservoir était de l'air sec, prélevé sur la réserve de 45 m<sup>3</sup> qui alimente les aubes injectrices. Depuis, le système a été doté d'un évaporateur qui fournit de l'azote gazeux à haute pression, qu'il est possible de stocker dans le réservoir de 45 m<sup>3</sup>, ce qui rend possible un fonctionnement en azote pur de la soufflerie.

L'injection périphérique d'azote liquide est effectuée le long de deux cercles sur chacun desquels sont distribués 16 gicleurs alimentés séparément. Chaque injecteur peut être alimenté ou non par sa propre électrovanne. Les diamètres des buses sont étagés de manière à rendre possible une variation du débit total, qui peut atteindre 24 kg/s, avec une résolution de l'ordre du millième. La pression d'injection étant ajustée, ce dispositif permet un contrôle digital performant du débit d'azote liquide.

En amont de l'ensemble d'électrovannes, le circuit comporte également une vanne de sécurité et un by-pass à faible débit permettant la mise en froid du circuit d'injection jusqu'aux électrovannes dotées de purges, avant l'essai proprement dit.

#### 1.2.4. Contrôle du débit évacué

Le débit évacué entre la veine d'essai et le coude injecteur et envoyé à l'atmosphère, est séparé en deux parties qui empruntent respectivement :

- une canalisation principale, dotée d'une vanne continue analogique, qui est en principe positionnée avant l'essai,
- une canalisation auxiliaire qui se divise en sept branches parallèles, à sections étagées, chacune munie d'une électrovanne, qui permet une régulation numérique à 127 niveaux de cette partie du débit.

#### 1.2.5. Système numérique de commande et d'acquisition

La soufflerie est dotée d'un système de contrôle et d'acquisition de données qui se compose de deux mini-ordinateurs de type HP 21 MX couplés,

mais assumant chacun des tâches bien précises. Tous deux ont la capacité d'exécuter des programmes en temps réel. Cet ensemble numérique est décrit de façon plus détaillée en référence /8/.

Le premier calculateur effectue l'acquisition et le traitement des mesures. Un système multiplexeur à 16 voies, fonctionnant à haut niveau de tension ( $\pm 10$  V), permet une cadence d'acquisition allant jusqu'à 16 kHz dans le cas d'un stockage des données sur bande magnétique. Un scanner à 100 voies, fonctionnant à faible niveau de tension, et dont la cadence d'acquisition de données peut atteindre 200 Hz, permet de prendre en compte les mesures permanentes de température (parois, carcasse métallique, grille et peigne fixe), par l'intermédiaire de l'une des voies du multiplexeur.

Ce calculateur est réservé à la mise au point et à la compilation des programmes. Il commande également les parois adaptables et les systèmes d'instrumentation, tels que les scanivalves et les explorateurs.

Le second calculateur est chargé de la commande et du contrôle de la soufflerie. Il exécute des programmes développés et compilés sur la première unité. Il est doté de son propre système d'acquisition qui se compose d'un multiplexeur à 16 voies avec une cadence d'acquisition de 45 kHz. Un terminal est réservé à l'initialisation de l'essai et à la diffusion des caractéristiques du fonctionnement et des messages au cours de celui-ci. Le calculateur dispose en permanence des paramètres de fonctionnement mesurés sur la soufflerie et commande l'injection d'air moteur et d'azote liquide, l'évacuation, le second col et pour les futurs essais avec maquette, l'introduction du profil.

En cours d'essai, un interrupteur manuel permet d'arrêter le programme de commande et de passer à la phase d'arrêt de la rafale.

Pour des raisons de sécurité, un dispositif électronique indépendant installé sur la liaison avec les vannes d'injection d'azote liquide et d'évacuation, vérifie la cadence des ordres du calculateur. Cette cadence doit être de 10 Hz et le dispositif déclenche la fermeture des vannes d'injection d'azote et l'ouverture des vannes d'évacuation, lorsqu'un écart sensible est détecté. Pendant l'essai, le calculateur contrôle les mesures 10 fois par seconde et passe à la phase d'arrêt de la rafale en cas d'anomalie.

#### 1.2.6. Déroulement d'une rafale cryogénique

Nous avons choisi une rafale à très basse température, faisant partie des essais avec détection optique de particules (Planche 30), réalisée à un nombre de Mach dans la veine de 0,83 et à une pression génératrice de 2 bars, pour illustrer le déroulement d'un essai cryogénique. La température nominale de l'essai  $T_i = 95 \text{ K}$  semble cependant être voisine de la limite du domaine de fonctionnement de la soufflerie (§ 3.3.3.).

La note citée en référence /8/ est consacrée à la méthode de commande et de régulation qui permet de réaliser une rafale cryogénique. Rappelons simplement que le principe général de la méthode consiste à traiter chaque phase de l'essai comme un problème de régulation particulier, ce qui permet l'utilisation de modélisations simplifiées de la soufflerie et, en particulier, de séparer le contrôle de la pression et du nombre de Mach de celui de la température.

La planche 5 présente l'évolution des paramètres de commande et de fonctionnement au cours de l'essai.

La phase préliminaire de toute rafale cryogénique consiste à lancer la soufflerie à température ambiante, à faible pression génératrice et à très faible nombre de Mach. Le débit d'air moteur injecté est suffisant pour obtenir un nombre de Mach dans la veine de 0,27. Le col non amorcé est déjà dans la position correspondant au nombre de Mach nominal de l'essai. Sur le circuit d'évacuation, les vannes de régulation sont toutes ouvertes et la vanne continue se trouve à une position compatible avec les valeurs nominales du Mach et de la pression. Dans notre cas, cette phase dure environ 5 secondes et la pression génératrice s'établit à une valeur de 1,1 bar.

La première phase de la rafale cryogénique consiste à refroidir et à stabiliser cet écoulement à faible nombre de Mach à la température nominale de l'essai. Les vannes d'injection d'air et d'évacuation restent dans leurs positions. Le calculateur commande l'injection d'un débit d'azote liquide égal au double de la valeur nécessaire pour refroidir le débit d'air moteur ( $Q_{LN2} = 3 \text{ kg/s}$  dans notre cas), puis le ramène à

cette valeur par une double rampe lorsqu'il prévoit que la quantité injectée est suffisante pour amener l'écoulement à la température visée. Après cette opération qui, dans notre cas, dure 20 secondes, la température génératrice est très voisine du niveau souhaité et le calculateur lance une régulation en boucle fermée de la température, identique à celle qui sera utilisée pendant la troisième phase et qui permet un ajustage plus fin. Cette phase prend fin lorsque la stabilisation à la température nominale est jugée satisfaisante. C'est à ce moment-là qu'au cours des futurs essais, le calculateur lancera l'ordre d'introduction de la maquette prérefroidie. Dans notre cas, la durée totale de la première phase est de 26 secondes, dont 6 secondes sont consacrées à la régulation finale.

La deuxième phase consiste à augmenter simultanément le nombre de Mach et la pression génératrice jusqu'aux valeurs nominales, tout en maintenant relativement constante la température de l'écoulement. Pendant toute cette phase, alors que les variations du Mach et de la pression sont effectuées par action sur les débits moteur et évacué, le maintien de la température est assuré de manière indépendante par un débit d'azote liquide calculé pour refroidir le débit d'air moteur et pour compenser l'effet de compression.

Au début de cette phase, les vannes de régulation se ferment sur le circuit d'évacuation et le débit moteur augmente jusqu'à une valeur qu'il gardera pendant la suite de l'essai et qui est suffisante pour amorcer le col et obtenir la pression de 2 bars souhaitée, compte tenu de la position choisie de la vanne continue d'évacuation. La pression génératrice augmente rapidement et lorsqu'elle atteint 2 bars, sa régulation par l'intermédiaire du débit évacué commence. Cette phase se termine lorsque sa stabilisation est obtenue. Sa durée est dans notre cas de l'ordre de 30 à 35 secondes. On constate également que pendant cette phase, la température de l'écoulement subit des variations assez importantes, de l'ordre de plusieurs degrés, autour de la valeur  $T_i = 95 \text{ K}$ .

Pendant la troisième phase, on maintient les paramètres de fonctionnement de la soufflerie aux valeurs nominales de l'essai, pendant la durée nécessaire aux mesures aérodynamiques. Celles-ci ont consisté dans le cas de nos essais, en explorations de température dans la veine et en

mesures de fluctuations de température et de pression. Pendant cette phase, se déroulent simultanément la régulation de la pression par le débit évacué et celle en boucle fermée de la température qui est reprise dès la partie finale de la phase précédente. On observera que pendant cette phase, qui dure une vingtaine de secondes, la température génératrice est remarquablement stable et reste comprise dans une bande de largeur 1 K. Le débit d'azote liquide est de l'ordre de 11 kg/s.

L'arrêt de la rafale est effectué en stoppant l'injection d'azote liquide et en ouvrant l'évacuation, avant de réduire le débit moteur.

## 2 - ETUDE DES FLUCTUATIONS DE PRESSION ET DE TEMPERATURE DE L'ECOULEMENT

Les fluctuations de température et de pression ont été analysées pendant la phase finale stabilisée de la rafale, en fonction de la température de l'essai, au nombre de Mach dans la veine  $M = 0,83$  et de la pression génératrice  $P_i = 2$  bars constants, le col aval étant amorcé. Les niveaux de température  $T_i = T_{\text{Ambiante}}$ ,  $T_i = 150$  K et  $T_i = 120$  K ont été particulièrement étudiés.

### 2.1. Instrumentation et traitement des mesures

#### 2.1.1. Mesure des pressions

Les fluctuations de pression statique dans la veine sont mesurées par deux capteurs Kulite miniatures, montés à la paroi, au voisinage du centre de l'une des portes latérales de la veine. Deux montages, notés K1 et K2, ont été utilisés (planche 6).

Le montage K1 cherche à réduire au maximum la cavité entre la prise de pression statique et la membrane du capteur de manière à obtenir une forte bande passante, qui atteint en fait une fréquence de l'ordre de 10 kHz. Un joint torique en caoutchouc assure l'étanchéité du volume de mesure et sert également, avec une bague en teflon située à l'arrière, à maintenir le capteur en position tout en lui évitant de fortes contraintes mécaniques. Le diamètre de la prise de pression est de 4/10 mm et l'ensemble du montage réalisé en métal constitue un canon de diamètre 10 mm,



encastré dans la paroi métallique. Aucune précaution particulière pour éviter le refroidissement du capteur en fonctionnement cryogénique n'intervient a priori dans la conception de ce montage, mais on peut remarquer qu'il n'y a pas de contact direct entre le capteur et le métal du montage.

Le montage K2 comporte également une cavité très réduite entre la prise de pression de diamètre 0,7 mm et le capteur, mais sa particularité principale est l'existence d'un canon en cuivre de diamètre 20 mm dans lequel le capteur est directement encastré sur une partie importante de sa longueur, et qui constitue un volant thermique destiné à réduire sa dérive en température lors d'une utilisation cryogénique. Le canon est isolé thermiquement de l'écoulement et de la paroi métallique : il est contenu dans un hublot en plexiglas et, une pastille cylindrique de plexiglas portant la prise de pression complète le montage entre le capteur et l'écoulement.

Malheureusement, il s'est avéré qu'en utilisation cryogénique des contraintes d'origine thermique faisaient apparaître une marche à la paroi au niveau de la jonction entre le hublot et la pastille. Des bandes de ruban adhésif de faible épaisseur, collées parallèlement à l'écoulement de part et d'autre de la prise de pression, ont permis de réduire beaucoup les erreurs de mesure dues à ce phénomène (surestimation de la fluctuation de pression).

Néanmoins, les résultats obtenus avec le montage K2 sont donnés uniquement à titre indicatif, toujours en comparaison avec ceux fournis par le montage K1, sur lesquels sont basées les conclusions de cette étude.

Rappelons qu'un capteur Kulite conserve une réponse linéaire en fonction de la pression lorsque sa température propre varie. Sa sensibilité et son indication à pression nulle varient légèrement avec la température. Il existe de plus une relation entre la température de la membrane et la résistance électrique du pont de jauges. Un tel capteur est donc utilisable même lorsque sa température dérive, sous réserve de mesurer simultanément son indication et la résistance du pont de jauge, et d'effectuer un étalonnage complet en fonction de la pression et de

la température. On trouve à la planche 7 l'étalonnage du capteur utilisé dans le montage K1.

La planche 8 présente des exemples d'évolution de la température du capteur, mesurée par l'intermédiaire de l'impédance du pont, dans le cas du montage K1, au cours d'essais à  $M = 0,8$  et aux températures génératrices 200 K, 150 K et 100 K. On constate que la diminution de température la plus importante, pour l'essai à  $T_i = 100$  K, ne dépasse pas une cinquantaine de degrés et que la variation de sensibilité correspondante est de 4,3 %. Nous avons donc conservé la sensibilité du capteur à température ambiante pour l'étude des fluctuations de pression.

### 2.1.2. Mesure des températures

Les fluctuations de température d'arrêt sont mesurées par l'intermédiaire de la résistance d'un "fil froid" disposé orthogonalement à l'écoulement au centre de la chambre de tranquillisation, immédiatement en amont du collecteur. L'inertie thermique du fil de tungstène de diamètre  $9 \mu$  est suffisamment faible pour que sa température suive celle de l'écoulement jusqu'à une fréquence de l'ordre de 50 Hz. Le fil est alimenté par un courant de faible intensité constante  $I = 3$  mA. Un étalonnage réalisé en présence de l'écoulement montre que sa résistance, mesurée par la tension à ses bornes, varie linéairement en fonction de la température.

On a également analysé du point de vue de la turbulence thermique, les mesures obtenues avec trois sondes de température, décrites de façon détaillée dans la note associée (REF. 10) et dont l'élément sensible est une plaquette de thermocouple cuivre-constantan de type RdF. La planche 15 présente schématiquement ces sondes.

La sonde notée  $T_i$  est l'élément central de la grille de 25 thermocouples disposée en sortie de chambre de tranquillisation. Elle mesure la température génératrice de référence de l'écoulement. La plaquette de thermocouple, portée par un support en bois dur, est disposée parallèlement à l'écoulement.

La sonde notée  $T_{isr}$  est la dent centrale du peigne d'exploration de la veine d'essai. Analogue à la précédente, elle mesure du fait de la vitesse élevée une température de frottement liée à la température génératrice par un facteur de récupération.

La sonde notée  $T_{isa}$  est la sonde de température d'arrêt placée dans la veine d'essai. La plaquette de thermocouple parallèle au vent est contenue dans un corps creux en bois destiné à arrêter isentropiquement l'écoulement.

### 2.1.3. Acquisition et traitement des mesures

Le signal mesuré pendant la phase finale de l'essai est numérisé à N points par seconde par la chaîne d'acquisition après un filtrage analogique qui élimine les fréquences supérieures à  $N/2$ . Les fluctuations sont étudiées par tranches de fréquence. Pour un cas d'essai donné, on effectue ainsi successivement deux ou trois acquisitions :

- filtrage à 40 Hz, numérisation à 100 pts/s,
- filtrage à 400 Hz, numérisation à 1000 pts/s,
- filtrage à 4000 Hz, numérisation à 10000 pts/s (uniquement dans le cas des fluctuations de pression à température ambiante).

Un programme utilisant la transformée de FOURIER permet de calculer le spectre moyen d'énergie du signal. Les grandeurs sont rendues adimensionnelles en utilisant la fréquence réduite  $n = \frac{f H}{U}$  (H hauteur de la veine ; U vitesse de l'écoulement) et l'énergie de fluctuation réduite  $F(n)$  telle que :

$$\int_0^{n \max} F(n) dn = \frac{\overline{p'^2}}{q^2} \quad \text{où } q = 1/2 \rho U^2 \quad \text{dans le cas}$$

de la pression et  $\int_0^{n \max} F_T(n) dn = \frac{\overline{T_i'^2}}{T_i^2} \quad \text{dans le cas de la}$   
température.

Les spectres présentés constituent en fait la moyenne de plusieurs spectres obtenus sur différents intervalles de temps. En raison de la

brièveté de la phase stabilisée et des évolutions de faible amplitude de la pression et de la température dues à la régulation à basse fréquence, les intervalles de temps susceptibles d'être exploités pour le calcul d'un spectre sont moins nombreux à basse température. Ceci explique que les spectres présentés pour des essais cryogéniques présentent quelquefois un aspect moins "lisse" que ceux obtenus à température ambiante (planche 12).

Ces méthodes dont nous venons de rappeler les principaux éléments ont été développées pour qualifier la soufflerie T2 à température ambiante dans le cadre du projet LEHRT /REF. 2/, nous les avons reprises avec des écoulements cryogéniques.

Au cours des essais cryogéniques qui ne sont pas spécialement destinés à l'étude des fluctuations, on réalise sur chaque voie de mesure une acquisition numérisée à 43,5 points par seconde, chaque point constituant en fait la moyenne de 23 points acquis toutes les millisecondes. Pour compléter les résultats dans le domaine des basses fréquences, le programme de calcul des spectres est également appliqué à certaines mesures de température et de pression, acquises de cette façon.

Enfin pour faciliter la lecture des résultats, nous donnons à température ambiante et à  $T = 120$  K, un tableau de correspondance entre la fréquence  $F$  et la fréquence réduite  $n$ .

$T = 290$  K

$n$	$F$ (Hz)
$10^{-3}$	0,8
$10^{-2}$	8
$10^{-1}$	76
1	764
10	7640

$$U = M \times \sqrt{\gamma RT}$$

$$M = 0,83$$

$$H = 0,37 \text{ m}$$

$T = 120$  K

$n$	$F$ (Hz)
$10^{-3}$	0,15
$10^{-2}$	5
$10^{-1}$	49
1	491
10	4915

$T_i =$	290	250	200	150	120	100 (K)
$F (n = 10^{-1}) =$	76	71	63	55	49	45 (Hz)

## 2.2. Fluctuations de pression

### 2.2.1. Première étude à basse fréquence

On donne aux planches 9 et 10, le signal en fonction du temps de la pression statique dans la veine, mesuré par les capteurs K1 et K2 et numérisé à 43,5 points par seconde, pour des températures d'essais ( $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars) s'étageant de la température ambiante à  $T_i = 100K$ .

La mesure effectuée par K1 montre une augmentation de l'amplitude des fluctuations qui ne devient sensible qu'à température relativement basse :  $T_i = 150 K, 120 K, 100 K$ .

K2 met en évidence une évolution analogue, mais avec des amplitudes exagérées à  $T_i = 200 K, 150 K, 120 K$  et une importante diminution, peu vraisemblable, à  $T_i = 100 K$ .

L'analyse spectrale de ces mesures, pour le capteur K1, conduit aux spectres à basse fréquence présentés à la planche 13. Les valeurs moyennes de  $\sqrt{n F(n)}$  relevées au niveau de fréquence réduite  $n = 10^{-2}$  sont reportées en fonction de la température de l'essai à la planche 14. On retrouve la tendance constatée par observation directe du signal : l'énergie de fluctuation évolue peu de la température ambiante à  $T_i = 200 K$  ( $\sqrt{n F(n)} \approx 0,3 \cdot 10^{-3}$ ) et augmente aux températures plus basses avec apparemment un maximum vers  $T_i = 120 K$  ( $\sqrt{n F(n)} \approx 0,5 \cdot 10^{-3}$ ) et une légère diminution pour  $T_i = 100 K$ . On compare à titre indicatif les spectres obtenus par les montages K1 et K2 à  $T_i = 150 K$ , à la planche 11.

### 2.2.2. Détermination des spectres de fluctuation sur une large bande de fréquence

Les résultats des essais ( $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars) spécialement consacrés à l'étude des fluctuations de pression avec le capteur K1, sont présentés à la planche 12.

A température ambiante trois acquisitions successives ont permis d'analyser le phénomène dans les gammes de fréquence  $F < 40 Hz$ ,  $F < 400 Hz$

et  $F < 4000$  Hz. Le spectre déterminé présente un niveau extrêmement faible aux basses fréquences ( $\sqrt{n F(n)} \simeq 0,3 \cdot 10^{-3}$  pour  $n < 10^{-1}$ ) et une augmentation progressive du niveau de fluctuation pour  $n > 10^{-1}$  correspondant au bruit des couches limites turbulentes de paroi.

Ce spectre est très voisin de celui mesuré avant la transformation du circuit pour un fonctionnement cryogénique et correspond aux exigences sévères du projet LEHRT.

Au niveau  $T_i = 120$  K, les fluctuations ont été mesurées dans les gammes de fréquence  $F < 40$  Hz et  $F < 400$  Hz. A  $T_i = 150$  K on s'est borné à la gamme  $F < 40$  Hz. Les spectres déterminés sont de forme identique à celle du spectre à température ambiante, avec une augmentation du niveau de fluctuation pour toutes les fréquences analysées. Les niveaux moyens de l'amplitude  $\sqrt{n F(n)}$  relevés à  $n = 10^{-2}$  passent de  $0,3 \cdot 10^{-3}$  à T Ambiante à  $0,4 \cdot 10^{-3}$  à  $T_i = 150$  K et  $0,5 \cdot 10^{-3}$  à  $T_i = 120$  K. Cette évolution des fluctuations en fonction de la température est cohérente avec la courbe déjà obtenue à basse fréquence (Planche 14).

Il est probable que ce phénomène soit lié au fonctionnement cryogénique, en corrélation avec la turbulence thermique de l'écoulement qui augmente lorsque la température de l'essai diminue, comme nous allons le présenter.

### 2.3. Fluctuations de température

On donne à la planche 16 le signal en fonction du temps de la température dans la chambre, mesuré par le fil froid et numérisé à 43,5 points par seconde aux températures d'essai  $T_i = T$  Ambiante,  $T_i = 150$  K et  $T_i = 120$  K (essais à  $M = 0,8$  et  $P_i = 2$  bars). Les signaux mesurés simultanément par les sondes à thermocouple Tisa et Tisr dans la veine et  $T_i$  dans la chambre, figurent également à cette planche.

A température ambiante la turbulence thermique est très faible. Le signal du fil froid fluctue très peu bien que la courbe présente un aspect haché dû à la résolution numérique du système d'acquisition. Aux niveaux  $T_i = 150$  K et  $T_i = 120$  K le fil froid met en évidence une très nette turbulence thermique.

L'amplitude moyenne crête à crête de la fluctuation passe d'une valeur de l'ordre de 0,1 K à température ambiante à une valeur d'environ 0,5 K à  $T_i = 150$  K et  $T_i = 120$  K. On constate également que la courbe de température peut comporter des irrégularités périodiques dues à la régulation effectuée par des modifications instantanées plus ou moins importantes du débit d'azote liquide, toutes les trois secondes.

Les sondes à thermocouple confirment l'existence de ces fluctuations mais il apparaît clairement que le temps de réponse le plus faible appartient au fil froid, dont le signal comporte les fréquences de l'ordre de 10 Hz à 20 Hz alors que ceux des sondes reprennent surtout les basses fréquences jusqu'à quelques Hertz.

Les résultats essentiels de l'analyse spectrale des fluctuations de température mesurées par le fil froid figurent à la planche 20.

Aux températures de fonctionnement  $T_i = 295$  K et  $T_i = 120$  K, on analyse successivement les gammes de fréquence  $F < 40$  Hz et  $F < 400$  Hz. Au niveau  $T_i = 150$  K on se limite à la bande  $F < 40$  Hz.

Le niveau de fluctuation est correctement mesuré pour les basses fréquences jusqu'à une valeur de l'ordre de 50 Hz ( $\sim n = 10^{-1}$ ). Au delà apparaît l'atténuation due à l'inertie thermique du fil de  $9 \mu$ , surtout visible dans le cas de l'acquisition à 1000 points/seconde ( $F < 400$  Hz) pour  $T_i = 120$  K. La fréquence de coupure à 40 Hz du filtre analogique apparaît également dans le cas des acquisitions à 100 points/seconde.

Les spectres obtenus présentent sous forme réduite un niveau sensiblement constant jusqu'à  $n = 10^{-1}$ , qui augmente lorsque la température de l'essai diminue.

Pour mieux préciser cette augmentation les spectres ont également été déterminés à partir d'autres mesures au fil froid, filtrées analogiquement à 40 Hz mais numérisées à 43,5 points/seconde, disponibles pour un nombre plus important d'essais cryogéniques. Ces spectres comportent eux aussi un niveau sensiblement constant jusqu'à une fréquence de l'ordre de 20 Hz, et sont présentés à la planche 21 pour les températures de fonctionnement 250 K, 200 K, 150 K et 100 K. Les valeurs quadratiques moyennes (RMS) de fluctuation obtenues ont été représentées en fonction de la température de l'essai en valeur absolue ( $\sqrt{T_i^2}$ )

et relative  $\left( \frac{\sqrt{T_i'^2}}{T_i} \right)$  à la planche 23.

On constate une importante augmentation de  $\frac{\sqrt{T_i'^2}}{T_i}$ , qui passe de  $1,5 \cdot 10^{-4}$  à température ambiante à  $1,4 \cdot 10^{-3}$  à  $T_i = 100$  K. Cette valeur est bien sûr liée à la diminution de la température, mais aussi à l'augmentation du niveau moyen de fluctuation  $\sqrt{T_i'^2}$  qui passe de 0,03 K à température ambiante à une valeur de l'ordre de 0,14 K pour des températures inférieures à 120 K.

On peut envisager d'attribuer l'origine physique de ces fluctuations, évidemment liées au fonctionnement cryogénique, à :

- un mélange imparfait de l'air moteur à température ambiante avec l'écoulement entraîné froid,
- un manque d'homogénéité du refroidissement par pulvérisation d'azote liquide,
- la régulation en température pour les variations à très basse fréquence.

Les spectres obtenus avec les sondes à thermocouple sont également présentés à titre indicatif, toujours en comparaison avec ceux obtenus avec le fil froid au cours des mêmes essais et avec les mêmes conditions d'acquisition, mise à part l'absence de filtres analogiques pour les sondes (Planches 17, 18, 19 et 22). Les fréquences de coupure, vraisemblablement liées à l'inertie thermique des sondes, semblent être de l'ordre de 3 Hz à 5 Hz.

### 3 - DETECTION DE PARTICULES DANS L'ECOULEMENT CRYOGENIQUE

Le but de cette étude est de détecter qualitativement la présence de particules (glace, glace carbonique, gouttelettes d'azote liquide, condensation du gaz de l'écoulement) dans la veine de la soufflerie en fonctionnement cryogénique et de préciser les conditions de température et de pression de leur apparition.



### 3.1. Dispositif optique de détection des particules

La méthode de détection repose sur l'augmentation de la lumière diffusée par un rayon laser lorsque celui-ci est traversé par des particules. Le dispositif est présenté à la planche 24.

Les portes latérales de la veine sont équipées de deux hublots en verre, dotés extérieurement de systèmes dégivrants, qui se font face. En traversant la veine, le faisceau d'un laser de faible puissance, coupe le champ optique d'un photomultiplicateur disposé du côté opposé. Les axes du laser et du photomultiplicateur sont inclinés par rapport à la normale à l'écoulement pour éliminer du champ de ce dernier tout reflet du rayon sur les hublots, tout en conservant visible une portion du faisceau traversant la veine. Le faisceau laser s'arrête sur une partie latérale peinte en noir mat du hublot opposé. Tous les essais sont effectués avec le même réglage géométrique de ce dispositif.

Une indication complémentaire de la présence de particules est obtenue en mesurant l'évolution en cours d'essai de la perte de charge du filtre anti-poussière, situé en entrée de la chambre de tranquillisation, susceptible de les retenir et d'être partiellement colmaté.

Une caméra de télévision nous permet de confirmer visuellement les évolutions du signal du photomultiplicateur : accroissement brutal et diminution progressive de la luminosité du rayon et notamment, à très basse température, masquage du faisceau laser par le brouillard de particules conduisant à l'annulation du signal du photomultiplicateur.

### 3.2. Présentation des essais et des planches

Les essais réalisés couvrent systématiquement tout le domaine de fonctionnement en température jusqu'au niveau  $T_i = 95$  K, au nombre de Mach dans la veine 0,8 et à la pression génératrice constante  $P_i = 2$  bars.

Les planches 25 et 30 présentent l'évolution de la température génératrice de l'écoulement, de l'indication du photomultiplicateur et de la perte de charge du filtre au cours de rafales réalisées aux températures  $T_i = 250$  K, 200 K, 150 K, 120 K, 100 K et 95 K. Signalons que l'accroissement rapide de la perte de charge du filtre qui intervient une fois

que l'écoulement a atteint sa température de consigne et qui dure une quinzaine de secondes, correspond à la phase d'accroissement du nombre de Mach dans la veine d'essai et de montée en pression génératrice.

Les planches 32 à 35 donnent pour ces mêmes essais, l'indication du photomultiplicateur en fonction de la température génératrice instantanée.

La courbe d'équilibre solide-vapeur du dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ , dans le diagramme (P,T) et pour des pressions faibles, figure à la planche 36.

Les courbes d'équilibre liquide-vapeur de l'oxygène et de l'azote, ainsi que les courbes de rosée de l'air et du mélange (11 %  $\text{O}_2$  ; 89 %  $\text{N}_2$ ) vers lequel tend le fluide de la soufflerie en fin de rafale, sont données dans le diagramme (P, T) à la planche 37.

Dans le cas d'une condensation dans la veine d'essai, dues aux conditions locales de pression et de température statiques, ces courbes peuvent être traduites dans le plan ( $P_i$ ,  $T_i$ ) des conditions génératrices de l'écoulement où elles sont paramétrées par le nombre de Mach dans la veine.

Pour l'azote et pour le mélange (11 %  $\text{O}_2$  ; 89 %  $\text{N}_2$ ) on trouve respectivement ces courbes aux planches 38 et 39.

### 3.3. Résultats

La rafale réalisée à  $T_i = 95$  K (Planche 30) qui est la plus froide de cette série d'essais, illustre bien l'ensemble des résultats obtenus.

Le signal du photomultiplicateur met en évidence l'apparition successive de trois trains de particules bien distincts, lorsque la température de l'essai décroît (Planches 25 à 30).

Les deux premiers passages débutent systématiquement à un niveau de température donné et l'apparition brutale des particules est suivie d'une diminution progressive de leur nombre. Nous serons conduits à les attribuer à la condensation de la vapeur d'eau et du gaz carbonique.

Le dernier passage est le plus dense et il apparaît uniquement à très basse température (Planches 30 et 31). Nous serons amenés à l'identifier avec la condensation sans phénomène de retard du fluide de l'écoulement dans la veine d'essai.

#### 3.3.1. Glace

La glace apparaît au début de la phase de mise en froid de l'écoulement à faible pression, à une température génératrice comprise entre 240 K et 250 K. Cette valeur relativement élevée met en évidence l'insuffisance du dessiccateur actuel, dont on peut admettre qu'il fixe le taux d'humidité du gaz présent dans le circuit étant donné que pour ces essais, celui-ci est systématiquement fermé lorsque l'écoulement est arrêté. En effet les performances du dessiccateur qui atteignent en fonctionnement optimal un point de rosée de  $-80^{\circ}\text{C}$  à pression atmosphérique, diminuent considérablement dans le cas d'une utilisation fréquente qui ne permet pas de régénérer suffisamment les billes d'alumine de la cartouche de dessiccation qui n'est pas en service. Au cours de cette série d'essais, un point de rosée de l'ordre de  $-30^{\circ}\text{C}$  est tout à fait plausible.

L'apparition des particules de glace est très brutale, elles sont détectées pendant une durée de l'ordre de 15 s, au cours de laquelle leur quantité décroît rapidement (Planche 27). On peut expliquer ce phénomène par la cristallisation rapide de la vapeur d'eau contenue dans le circuit et la rétention progressive de la majorité des cristaux par le filtre anti-poussière placé en entrée de chambre, ce qui produit la décroissance du signal du photomultiplicateur. Enfin, un régime d'équilibre s'établit entre la quantité de vapeur d'eau injectée avec l'air moteur qui produit constamment des cristaux et la rétention opérée par le filtre. L'augmentation régulière de la perte de charge du filtre, mesurée pendant la phase finale à nombre de Mach élevé, confirme ce phénomène. Au cours d'essais à  $T_i = 200$  K et  $T_i = 150$  K (Planches 26 et 27) pour lesquels seule l'apparition de la glace est mise en évidence, on enregistre une pente de l'ordre de 0,07 mbar/s.

### 3.3.2. Neige carbonique

La glace carbonique se condense à une température génératrice de l'ordre de  $T_i = 135$  K. Dans le cas de nos essais ( $T_i = 120$  K, 100 K et 95 K) cette condensation a lieu pendant la phase de mise en froid de l'écoulement à faible pression. Le niveau de température observé est compatible avec la courbe d'équilibre solide-vapeur (Planche 36) et la concentration moyenne du dioxyde de carbone dans l'air (0,03 % à 0,06 % en volume) qui donnent pour une pression de 1,1 bar absolu une température de condensation comprise entre 129 K et 134 K.

Le phénomène est analogue à celui observé avec la glace : condensation rapide du gaz carbonique contenu dans le circuit et disparition progressive de la majorité des particules retenues par le filtre (Planches 28, 29 et 30). On relève au cours de la phase finale à  $M = 0,83$  des mêmes essais un accroissement régulier de la perte de charge du filtre allant de 0,13 à 0,21 mbar/s vraisemblablement dû en grande partie à la condensation et à la rétention de l'apport permanent de vapeur d'eau et de gaz carbonique par le débit moteur.

### 3.3.3. Condensation du fluide dans la veine d'essai

Un très important passage de particules à basse température génératrice est mis en évidence passagèrement au cours de l'essai réalisé à  $T_i = 95$  K, à la faveur d'une diminution momentanée de la température génératrice (Planches 30 et 31). Le phénomène se produit au début de la phase stabilisée à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars, à la reprise de la régulation en boucle fermée de la température /REF. 8 et 10/. La planche 31 reprend à plus grande échelle l'évolution, au cours de cette partie de la rafale, du débit d'azote liquide, de la température génératrice et du signal du photomultiplicateur.

La corrélation entre la réduction brutale du débit d'azote liquide lors de la reprise de la régulation par échelons et la remontée de la température génératrice apparaît nettement et met en évidence le temps de retard de l'ordre de la seconde.

La source de référence à  $0^\circ\text{C}$  utilisée dans le cas de l'acquisition continue de  $T_i$  étant peu stable, on est amené à corriger la mesure d'un demi-degré par référence à celle effectuée avec le même thermocouple par le scanner qui dispose d'une source de référence propre à température ambiante, plus fiable.

Le signal du photomultiplicateur croît brutalement lorsque la température génératrice devient inférieure à une valeur comprise entre 92 K et 93 K, et retrouve son niveau d'avant le phénomène lorsqu'elle redevient supérieure à ce seuil environ 7 secondes plus tard.

L'observation directe par caméra nous permet de constater l'importance et la durée limitée du phénomène et de vérifier que l'annulation du signal du photomultiplicateur est due à un brouillard très intense qui masque le faisceau du laser.

Au moment de l'apparition et de la disparition des particules, les conditions statiques de température et de pression dans la veine d'essai sont  $P_s = 1,27$  bars et  $T_s = 81,3$  K ( $T_i = 92,5$  K ;  $P_i = 2$  bars ;  $M = 0,83$ ).

Ces valeurs conduisent à attribuer le phénomène à la condensation

dans la veine d'essai et sans retard, du mélange (11 %  $O_2$  ; 89 %  $N_2$ ) qui constitue le fluide de l'écoulement en fin de rafale. Cette composition résulte du mélange des débits d'air moteur et d'azote réfrigérant qui pour notre essai, sont du même ordre. Le point obtenu se place sur la courbe de rosée de ce mélange gazeux (Planche 37).

Signalons que deux autres essais à basse température ont permis de reproduire le phénomène. Le seuil de condensation ( $T_i \simeq 93$  K) est le même et le brouillard se maintient tant que la température génératrice reste inférieure à cette valeur.

Dans la mesure où l'identification de ce phénomène est correcte, les conditions locales de pression et de température de son apparition sont connues et on peut les traduire en fonction des paramètres de l'écoulement  $P_i$ ,  $T_i$  et  $M_{veine}$  (Planche 39).

Ceci constitue une première estimation, veine vide, des limites de fonctionnement de la soufflerie T2 vers les basses températures. Cette limite est d'autant plus élevée que la pression génératrice et le nombre de Mach augmentent. Cependant, à la pression génératrice  $P_i = 3$  bars et pour des nombres de Mach inférieurs à  $M = 1$ , elle ne dépasse pas  $T_i = 100$  K.

#### 3.3.4. Remarques complémentaires

##### - Détermination des températures de condensation

La température génératrice instantanée mesurée dans la chambre de tranquillisation ne constitue en fait un paramètre pour ces phénomènes de condensation, qu'en phase stabilisée, ce qui est notamment le cas lors de l'apparition pour  $T_i < 93$  K de la condensation du fluide dans la veine. Pendant la mise en froid de l'écoulement, il existe dans le circuit en amont de la chambre des températures qui lui sont inférieures de plus d'une dizaine de degrés. On relève ainsi au cours des essais réalisés à  $T_i = 95$  K et  $T_i = 100$  K des températures génératrices à l'apparition de la glace et de la neige carbonique qui sont respectivement de 275 K et 150 K. Des essais à des niveaux de température systématiquement répartis permettent de mieux préciser les conditions

de condensation et conduisent aux valeurs données précédemment. On vérifie en particulier qu'à  $T_i = 250$  K, le photomultiplicateur ne signale aucune particule dans la veine et la perte de charge du filtre demeure constante. A  $T_i = 200$  K et  $T_i = 150$  K, la glace seule est détectée. Plusieurs essais réalisés à  $T_i = 120$  K et  $T_i = 100$  K, mettent en évidence l'apparition et la disparition successive de la glace et de la glace carbonique, mais aucun autre passage important de particule n'est détecté à basse température. La température de condensation retenue pour  $\text{CO}_2$  est tirée de l'essai à  $T_i = 120$  K au cours duquel les particules apparaissent à la température génératrice instantanée 135 K, relativement voisine de la valeur établie.

- La question des gouttelettes d'azote liquide non vaporisé

Lors de la préparation de l'adaptation cryogénique de T2, une étude antérieure a été effectuée à la soufflerie pilote T'2, avec un dispositif laser-photomultiplicateur analogue, pour détecter la présence éventuelle de gouttelettes d'azote liquide non vaporisé dans la veine au cours d'essais cryogéniques à une pression génératrice de l'ordre de 1,8 bar absolu, et à  $M = 0,8$  /REF. 12/.

Comme dans le cas de la soufflerie T2, l'injecteur périphérique d'azote liquide était situé immédiatement en aval de l'injection d'air moteur, mais la chambre de tranquillisation ne comportait pas de filtre anti-poussière. Le photomultiplicateur était doté d'un seuil réglable, lui permettant de ne compter que les particules de dimension supérieure à une certaine valeur.

Les résultats significatifs de cette étude sont :

- l'apparition systématique et brutale d'un nombre important de particules relativement petites lorsque la température génératrice devient inférieure à la valeur 137 K, qui ne diminue pratiquement pas pendant la suite de la rafale,
- l'apparition progressive à partir d'une température plus basse de l'ordre de  $T_i = 115$  K d'un nombre moins important de particules relativement grosses.

La comparaison avec les résultats actuels obtenus à T2 permet d'affirmer que les particules détectées en dessous du niveau  $T_i = 137\text{ K}$  étaient de la glace carbonique et qu'il est probable que les particules plus grosses mises en évidence à basse température étaient effectivement des gouttelettes d'azote liquide.

Il convient donc de souligner qu'au cours des essais actuels à T2, aucun passage important de gouttelettes d'azote liquide non vaporisé n'a été mis en évidence. Il n'est pas exclu que le passage constant de particules, relativement peu important, détecté à basse température lorsque la plupart des cristaux ont été arrêtés par le filtre, comporte une part de gouttelettes d'azote. D'autre part, notre dispositif assez simple ne nous renseigne pas sur la taille des particules.

Cependant les gouttelettes d'azote liquide en cours de vaporisation ne peuvent atteindre la veine qu'en traversant le filtre anti poussière et les grillages de la chambre de tranquillisation.

D'autre part, les conditions moyennes de température et de pression restent toujours relativement éloignées de la limite de condensation de l'azote ( $P = 2\text{ bars}$ ,  $T_{\text{équilibre}} = 84\text{ K}$ ). Il est très probable que pour des quantités de gouttelettes modérées, l'efficacité du filtre anti-poussière pour les éliminer soit considérable, en les arrêtant et en favorisant l'échange thermique avec l'écoulement gazeux.

Une part de l'augmentation de la perte de charge du filtre peut donc être imputée à une éventuelle rétention de gouttelettes, mais de ce point de vue, les essais ne permettent pas de mettre en évidence d'effets significatifs.

#### - La rétention de la glace et de la neige carbonique par le filtre anti-poussière

Jusqu'ici nous avons présenté le phénomène de rétention des cristaux par le filtre de manière apparemment simple, mais son mécanisme réel est sans doute assez complexe. Les essais mettent en évidence certaines particularités significatives.



La diminution du nombre de cristaux brutalement apparus est franche et rapide lorsque le seuil de condensation est franchi en phase de diminution rapide de la température et lorsque la température finale de l'essai est nettement inférieure à ce seuil (essais à  $T_i = 150$  K, 100 K et 95 K aux planches 27, 29 et 30).

Lorsque la température finale de l'essai est assez voisine des conditions de cristallisation, la diminution dans le temps du nombre de particules est moins nette (essais à  $T_i = 200$  K pour la glace et  $T_i = 120$  K pour la neige carbonique aux planches 26 et 28). Cependant lorsque le nombre de particules détectées est tracé en fonction de la température génératrice instantanée (Planches 32 et 33), on retrouve des courbes assez comparables à celles des essais pour lesquels la diminution en fonction du temps est plus franche.

Enfin, lors de la remontée en température en fin d'essai, on détecte systématiquement un bref passage de particules lors du franchissement des seuils de condensation de la neige carbonique et de la glace.

L'efficacité du filtre anti-poussière pour retenir les cristaux semble donc être liée à l'écart de température entre l'écoulement et le seuil de cristallisation et augmenter avec lui.

Au voisinage des conditions de condensation, on peut envisager pour les cristaux retenus par le filtre la possibilité de se revaporiser pour se condenser à nouveau en aval.

- Effet de la vitesse de l'écoulement sur l'indication du photomultiplicateur.

Au cours de la phase de montée en nombre de Mach et en pression, on constate systématiquement une diminution de l'indication du photomultiplicateur (Planches 27, 29 et 30) qu'on peut attribuer à un effet de vitesse. En effet la lumière diffusée par le rayon laser dépend de la vitesse à laquelle un champ de particules donné le traverse.

Il convient donc de ne pas oublier ce phénomène lorsqu'on compare en valeur absolue l'indication du photomultiplicateur pour des phénomènes intervenant à faible vitesse (glace, neige carbonique) à celle

obtenue à  $M = 0,83$  (condensation du fluide, neige carbonique et glace pendant la remontée en température en fin d'essai qui est effectuée à Mach élevé).

#### 4 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A température ambiante, le spectre des fluctuations de pression a été très peu modifié par l'adaptation cryogénique du circuit, et répond toujours aux exigences sévères du projet L.E.H.R.T.

L'augmentation, en régime cryogénique, du niveau des fluctuations de pression sur l'ensemble du spectre, vraisemblablement liée à celle de la turbulence thermique, reste modérée.

Cependant, l'accroissement, lorsque la température de l'essai décroît, de la valeur moyenne de la fluctuation de température, pour des fréquences inférieures à 50 Hz, est nette et devient d'autant plus sensible en valeur relative. On peut attribuer ce phénomène au manque d'homogénéité du mélange entre l'écoulement principal froid et l'air moteur à température ambiante d'une part ainsi qu'à celui du refroidissement par pulvérisation d'azote d'autre part.

Certains cas d'essai en transition naturelle sont extrêmement sensibles au niveau de bruit de l'écoulement, la position de transition pouvant se déplacer de manière importante lorsque  $\sqrt{T'_i{}^2} / T_i$  ou  $\sqrt{U'^2} / U$  varient. Il conviendra donc d'effectuer des recoupements entre des essais à température ambiante, à pression élevée et des essais cryogéniques au même nombre de Reynolds avant de se prononcer définitivement sur les effets de cette augmentation des fluctuations en régime cryogénique.

Dans l'avenir, un nouveau dessiccateur devrait permettre de réduire considérablement la présence de vapeur d'eau et de gaz carbonique dans la soufflerie, dont la condensation au cours d'essais cryogéniques a pu être mise en évidence. Il sera également possible de fonctionner entièrement à l'azote, en rechargeant le réservoir d'air moteur en azote gazeux pur obtenu par évaporation de la phase liquide.

La limite de fonctionnement vers les basses températures sera alors liée à la condensation du fluide dans la veine. Les essais avec détection de particules, effectués veine vide, montrent d'ores et déjà qu'une température génératrice de 100 K est largement réalisable pour des essais transsoniques jusqu'à une pression génératrice atteignant 3 bars. Des essais avec maquette permettront d'affiner le domaine de fonctionnement et de voir si des condensations locales dans les zones à Mach élevé constituent la limite réelle d'utilisation.

#### REFERENCES

- /1/ CARRIERE P. "The induction driven tunnel"  
AGARD Lecture Series on Large Transonic  
Wind Tunnels, V.K.I., January 1973 et  
AGARD Report R-600-72.
  
- /2/ MICHEL R. "The induction driven tunnel T2 at ONERA/CERT :  
QUEMARD C. flow qualities, testing techniques and  
MIGNOSI A. examples of results".  
Journal of Aircraft, Vol. 16, n° 3 (Mars 79).
  
- /3/ MICHEL R. "A cryogenic transonic intermittent tunnel  
project : the induced-flow cryogenic wind-  
tunnel T2 at ONERA/CERT"  
AGARD Lecture Series n° 111 on Cryogenic  
Wind Tunnels (May 1980).
  
- /4/ BLANCHARD A. "Recherches sur une soufflerie cryogénique  
DOR J.B. fonctionnant par induction"  
MIGNOSI A. La Recherche Aérospatiale 1981-2 (Mars-Avril)  
BREIL J.F.
  
- /5/ MIGNOSI A. "La soufflerie transsonique à induction T2 :  
FAULMANN D. fonctionnement à température ambiante et  
SÉRAUDIE A. adaptation cryogénique"  
La Recherche Aérospatiale 1981-3 (Mai-Juin).
  
- /6/ MICHEL R. "Adaptation et premier fonctionnement cryogé-  
MIGNOSI A. nique de la soufflerie T2 de l'ONERA/CERT".  
La Recherche Aérospatiale 1982-2 (Mars-Avril).

- /7/ DOR J.B.  
PAYRY M.J.  
"Etude de faisabilité du prérefroidissement des maquettes pour la soufflerie cryogénique T2"  
R.T. OA n° 16/5007 AYD (DERAT n° 16/5007 DY),  
Juillet 1982.
- /8/ GOBERT J.L.  
MIGNOSI A.  
"Studies on cryogenic induction driven wind tunnel T2"  
ETW Cryogenic Technology Review Meeting,  
NLR, Amsterdam, 15-17 Sept. 83.
- /9/ BLANCHARD A.  
MIGNOSI A.  
"Problems involved by the instrumentation and the conception of cryogenic tests".  
ETW Cryogenic Technology Review Meeting,  
NLR, Amsterdam, 15-17 Sept. 82.
- /10/ DOR J.B.  
MIGNOSI A.  
PLAZANET M.  
"Qualification de la soufflerie T2 en fonctionnement cryogénique.  
A) Champ thermique. Etude préliminaire d'une maquette schématique"  
R.T. OA n° 24/5006 AND (DERAT n° 24/5006 DN)  
Août 1983.
- /11/ FRANCOIS G.  
"Thermal Behaviour and Insulation of a Cryogenic Wind Tunnel"  
ETW Cryogenic Technology Review Meeting,  
NLR, Amsterdam, 15-17 Sept. 83.
- /12/ DINGUIRARD M  
SERROT G.  
BLANCHARD A.  
DOR J.B.  
"Etude qualitative de l'apparition du brouillard d'azote dans la soufflerie cryogénique à induction T'2"  
Rapport 1/6059 - Février 1980
- /13/ SERAUDIE A.  
PAYRY M.J.  
"Mise au point du système de prérefroidissement de profils adaptés aux essais de T2 cryogénique.  
Tests de mise en froid du profil CAST 7".  
R.T. OA n° 56/1685 AND (DERAT 2/5019 DN),  
Octobre 1983.

LISTE DES PLANCHES

- PL. 1 : Schéma général de la soufflerie transsonique cryogénique T2 et ses servitudes.
- PL. 2 : Vue générale de la soufflerie T2.
- PL. 3 : Système de commande et de contrôle de la soufflerie.
- PL. 4 : Domaine de fonctionnement de la soufflerie cryogénique T2.
- PL. 5 : Evolution des paramètres de commande et de fonctionnement de la soufflerie T2 au cours de la rafale cryogénique de caractéristiques  $T_i = 95 \text{ K}$ ,  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$ .
- PL. 6 : Montages de capteurs Kulite à la paroi de la veine, utilisés pour la mesure des fluctuations de pression.
- PL. 7 : Variation de la sensibilité, de l'impédance interne et de l'indication à pression nulle du capteur Kulite K1, en fonction de sa température.
- PL. 8 : Exemples de refroidissement d'un capteur Kulite monté à la paroi de la veine (montage K1) au cours de rafales cryogéniques à  $M = 0,8$  et à divers niveaux de température.
- PL. 9 : Signaux de pression mesurés par les capteurs Kulite à la paroi au cours d'essais à  $M = 0,8$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  et à diverses températures génératrices, le col aval de la veine étant amorcé.
- PL. 10 : Signaux de pression mesurés par les capteurs Kulite à la paroi au cours d'essais à  $M = 0,8$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  et à diverses températures génératrices, le col aval de la veine étant amorcé.

- PL. 11 : Comparaison des spectres de fluctuation de pression à basse fréquence, obtenus par les montages K1 et K2 au cours d'un essai à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2$  bars et  $T_i = 150$  K.
- PL. 12 : Ensemble des spectres de fluctuation de pression mesurés avec le montage K1 aux températures d'essai  $T_i = 120$  K,  $T_i = 150$  K et  $T_{\text{Ambiante}}$ , pour  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars, le col aval étant amorcé.
- PL. 13 : Ensemble des spectres de fluctuation de pression à basse fréquence, mesurés avec le montage K1, à diverses températures d'essai, pour  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars.
- PL. 14 : Evolution du niveau de fluctuation de pression à basse fréquence en fonction de la température de l'essai, à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars.
- PL. 15 : Schéma et notation des sondes de température à thermocouple RdF Cuivre-Constantan.
- PL. 16 : Signaux de température mesurés par le fil froid de diamètre  $9 \mu$  et les sondes à thermocouple au cours d'essais à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars, aux températures génératrices  $T_i = 120$  K,  $T_i = 150$  K et  $T_{\text{Ambiante}}$ .
- PL. 17 : Spectres de fluctuation de température obtenus à température ambiante,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars, avec différents moyens de mesure.
- PL. 18 : Spectres de fluctuation de température obtenus à  $T_i = 150$  K,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars, avec différents moyens de mesure.
- PL. 19 : Spectres de fluctuation de température obtenus à  $T_i = 120$  K,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars, avec différents moyens de mesure.
- PL. 20 : Regroupement de l'ensemble des spectres de fluctuation de température mesurés grâce au fil froid ( $\varnothing = 9 \mu$ ) aux températures génératrices 120 K, 150 K et 295 K, à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars.

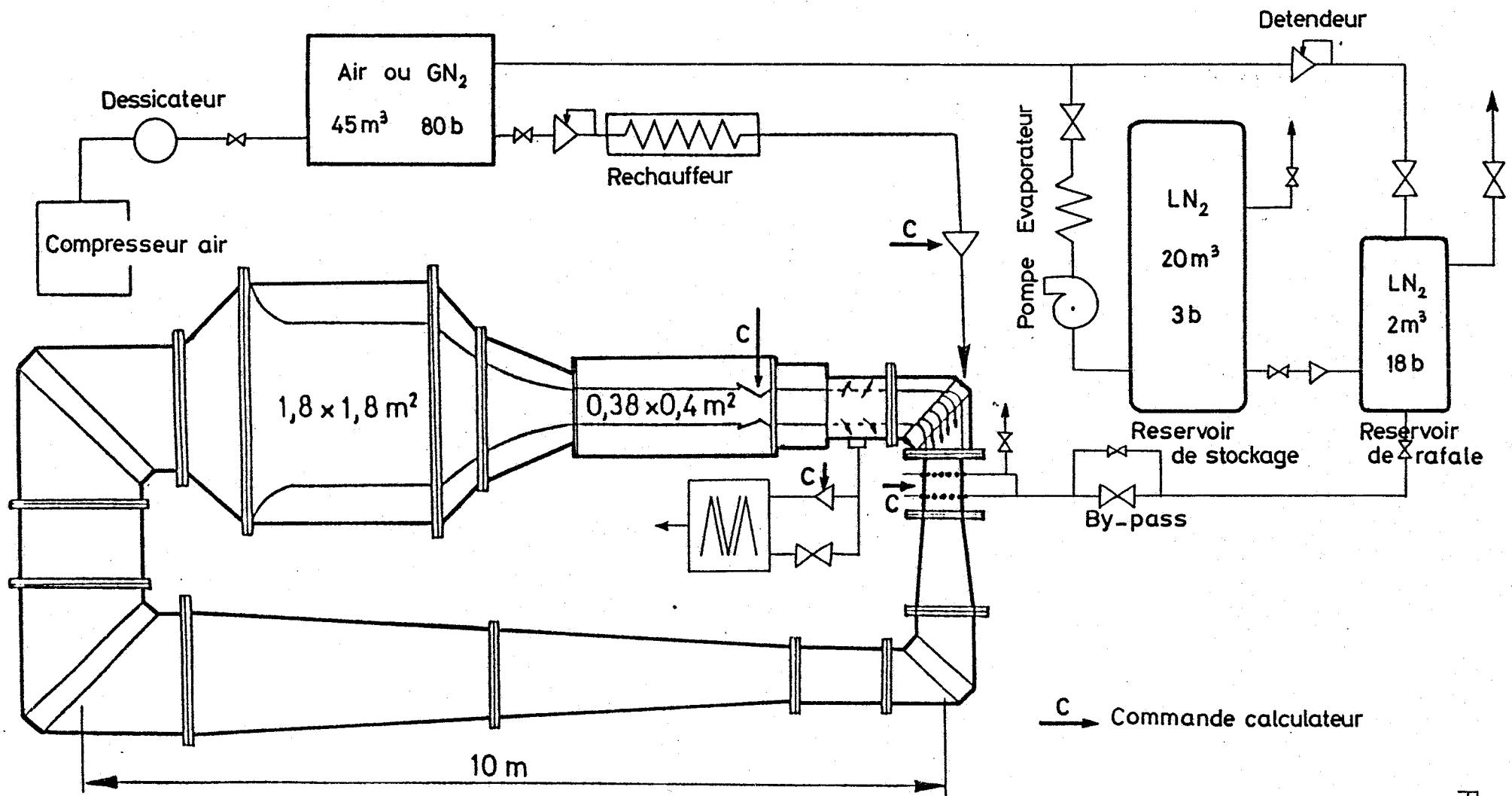
- PL. 21 : Exemples de spectres de fluctuation de température mesurés à basse fréquence par le fil froid, à divers niveaux de température, à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars.
- PL. 22 : Exemples de spectres de fluctuation de température, obtenus à basse fréquence avec la sonde à thermocouple mesurant  $T_i$  dans la chambre de tranquillisation, à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2$  bars et à divers niveaux de température.
- PL. 23 : Evolution du niveau quadratique moyen de fluctuation de température, en valeur relative et en valeur absolue, en fonction de la température de l'essai, à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars.
- PL. 24 : Schéma du dispositif optique de détection de particules.
- PL. 25 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une rafale cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2$  bars et  $T_i = 250$  K.
- PL. 26 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une rafale cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2$  bars et  $T_i = 200$  K.
- PL. 27 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une rafale cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2$  bars et  $T_i = 150$  K.
- PL. 28 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une rafale cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2$  bars et  $T_i = 120$  K.
- PL. 29 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une rafale cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2$  bars et  $T_i = 100$  K.

- PL. 30 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une rafale cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2$  bars et  $T_i = 95$  K.
- PL. 31 : Représentation à grande échelle de l'évolution de la température génératrice de l'écoulement et du débit d'azote liquide injecté, pendant la détection d'un passage très important de particules, à basse température, au cours de l'essai  $T_i = 95$  K,  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2$  bars.
- PL. 32 : Représentation de l'indication du photomultiplicateur en fonction de la température génératrice instantanée de l'écoulement, pour les essais à  $T_i = 200$  K et  $T_i = 150$  K, à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars.
- PL. 33 : Représentation de l'indication du photomultiplicateur en fonction de la température génératrice instantanée de l'écoulement, pour l'essai à  $T_i = 120$  K,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars.
- PL. 34 : Représentation de l'indication du photomultiplicateur en fonction de la température génératrice instantanée de l'écoulement, pour l'essai à  $T_i = 100$  K,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars.
- PL. 35 : Représentation de l'indication du photomultiplicateur en fonction de la température génératrice instantanée de l'écoulement, pour l'essai à  $T_i = 95$  K,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars.
- PL. 36 : Courbe d'équilibre vapeur-solide du gaz carbonique, pour des pressions faibles, dans le diagramme (P,T).
- PL. 37 : Courbes de rosée des mélanges Oxygène-Azote dans le diagramme (P,T).
- PL. 38 : Courbes de condensation d'un écoulement d'azote pur, dans la veine d'essai, en fonction des paramètres de l'essai : représentation paramétrée suivant M dans le plan ( $P_i$ ,  $T_i$ ).

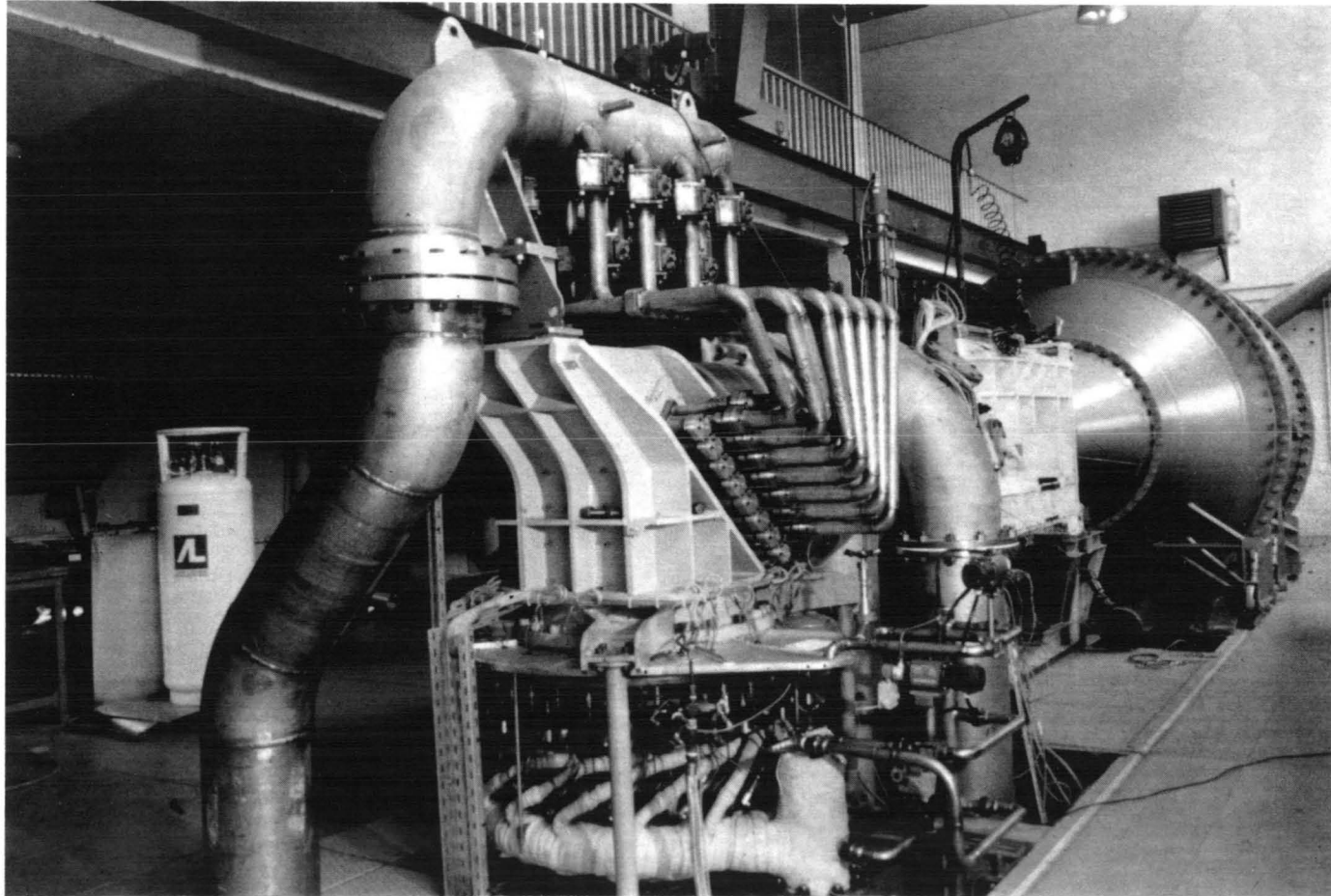


PL. 39 : Courbes de rosée du mélange Air-Azote (89 % N<sub>2</sub> - 11 % O<sub>2</sub>)  
dans la veine d'essai, en fonction des paramètres de l'écou-  
lement (M, P<sub>i</sub>, T<sub>i</sub>).

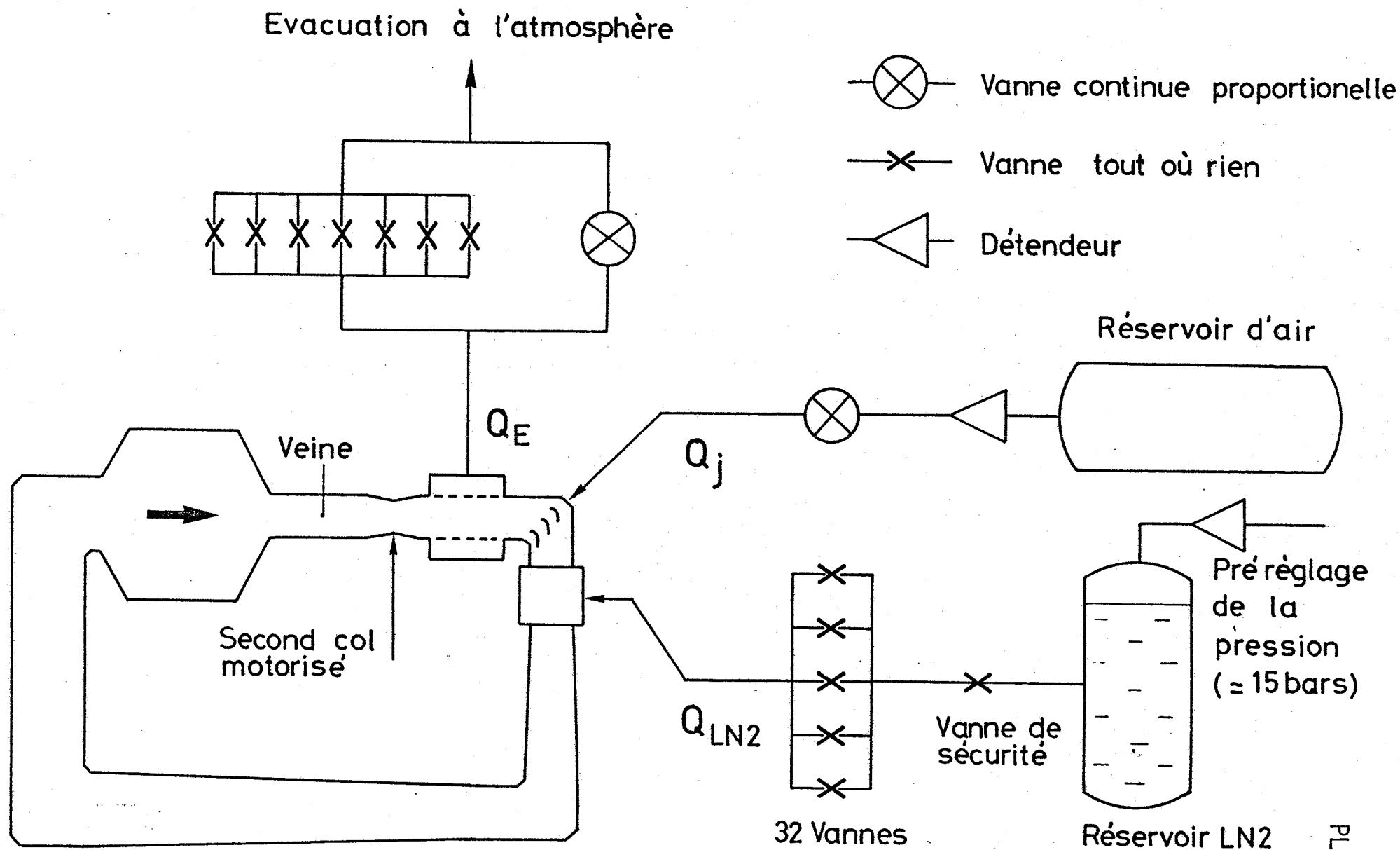
---



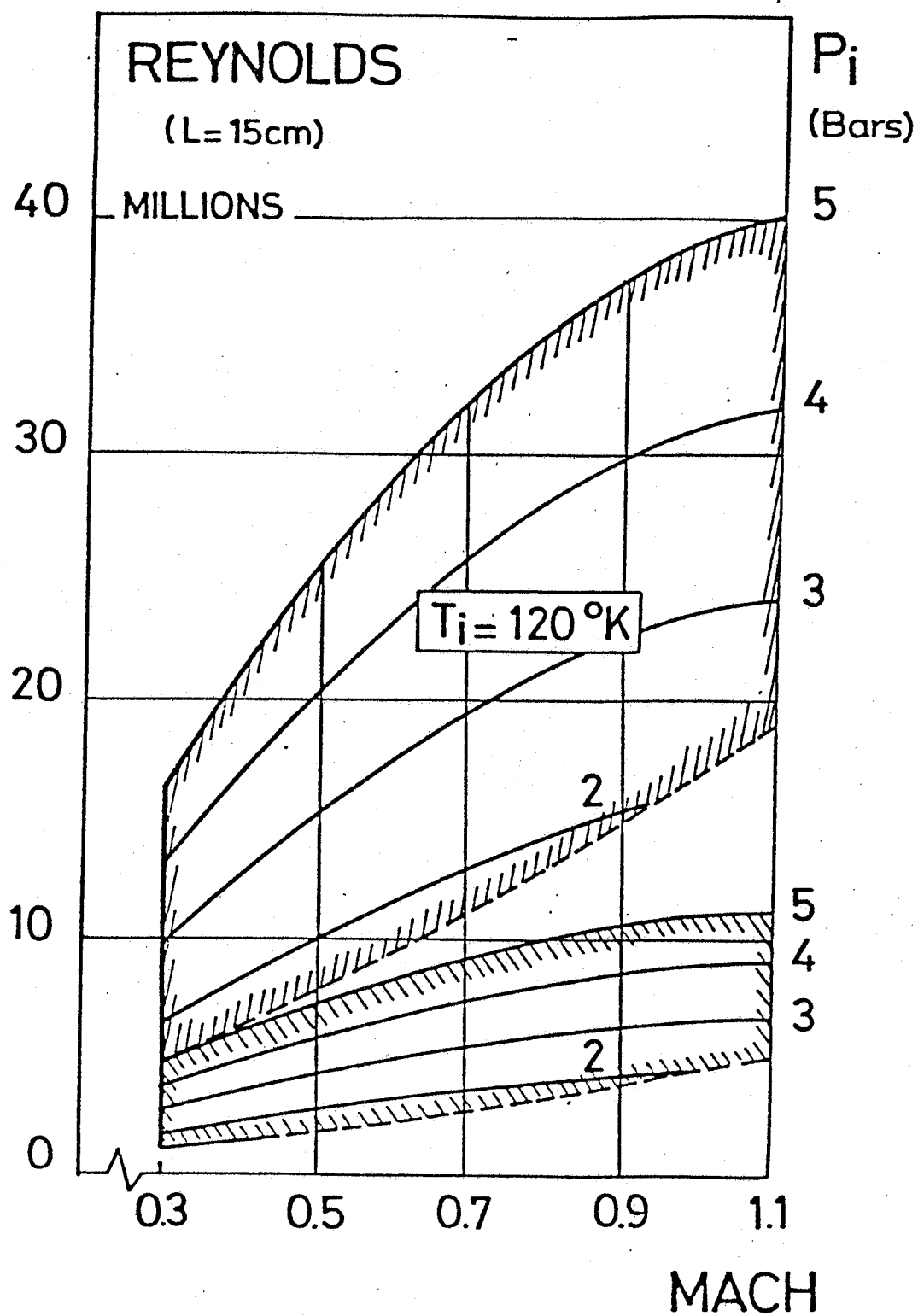
PL. 1 : Schéma général de la soufflerie transsonique cryogénique T2 et ses servitudes



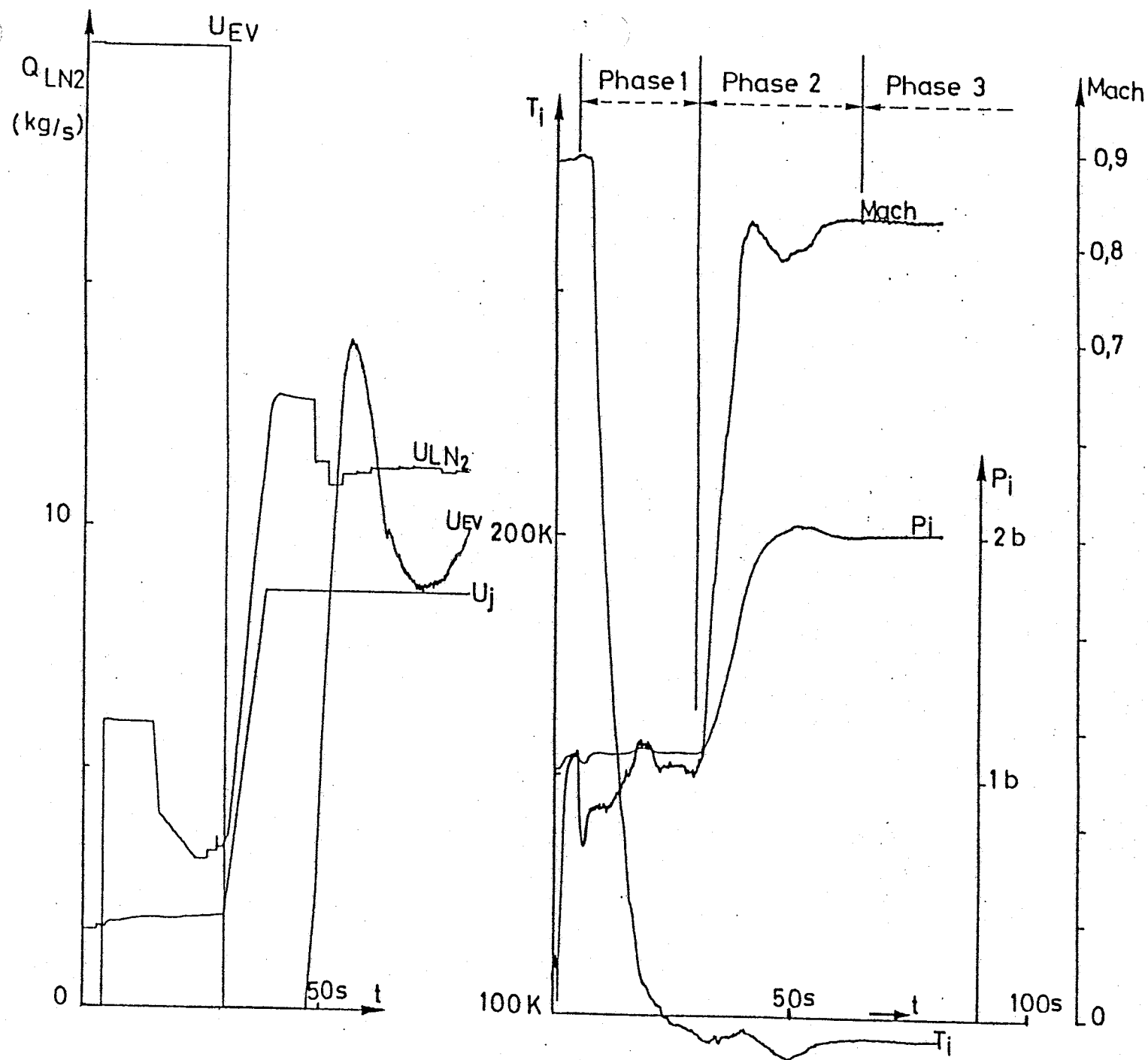
Vue générale de la soufflerie T2



PL. 3 : Système de commande et de contrôle de la soufflerie



PL. 4 : Domaine de fonctionnement de la soufflerie cryogénique T2



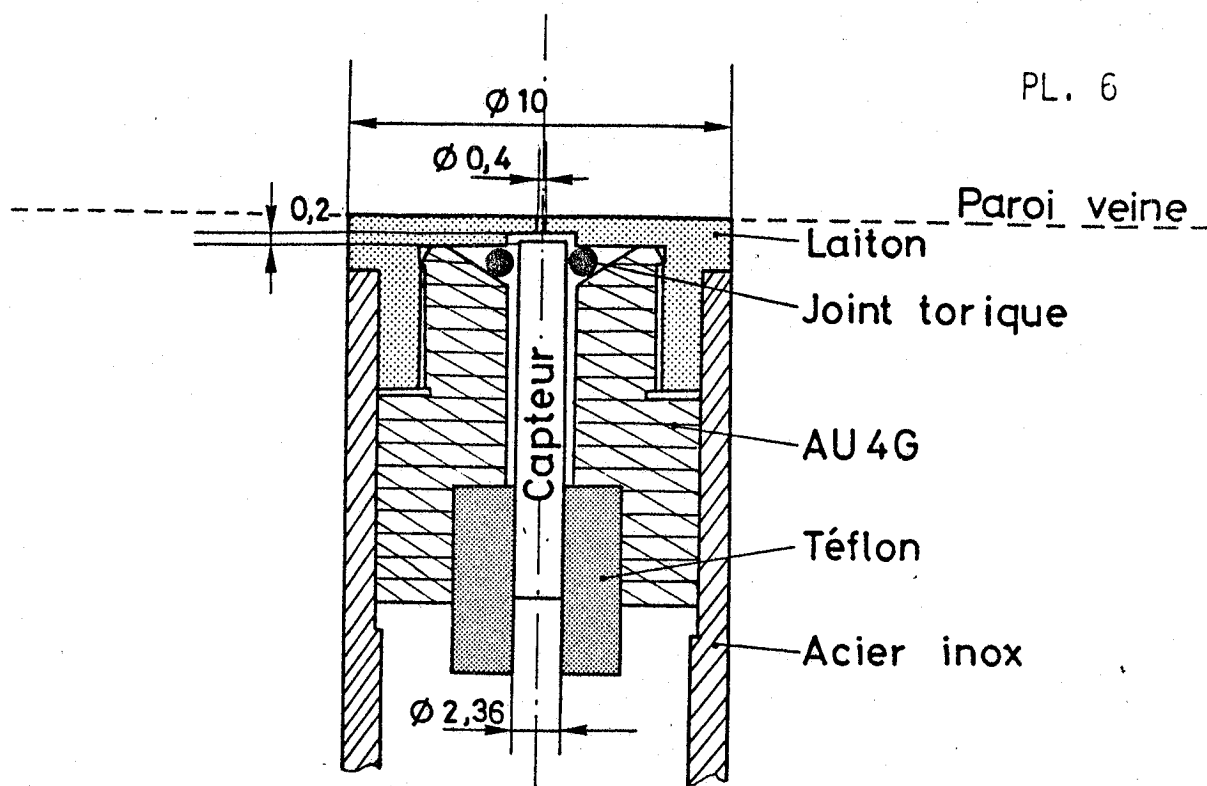
RAFALE  
CRYOGÉNIQUE

$T_i = 95 \text{ K}$

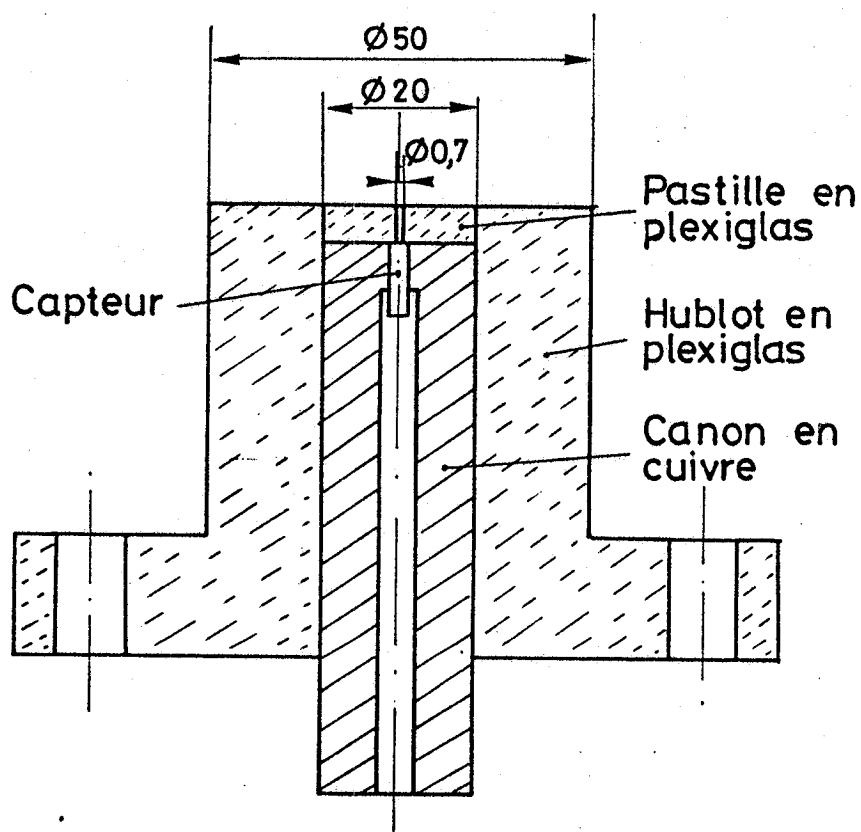
$M = 0,83$

$P_i = 2 \text{ bars}$

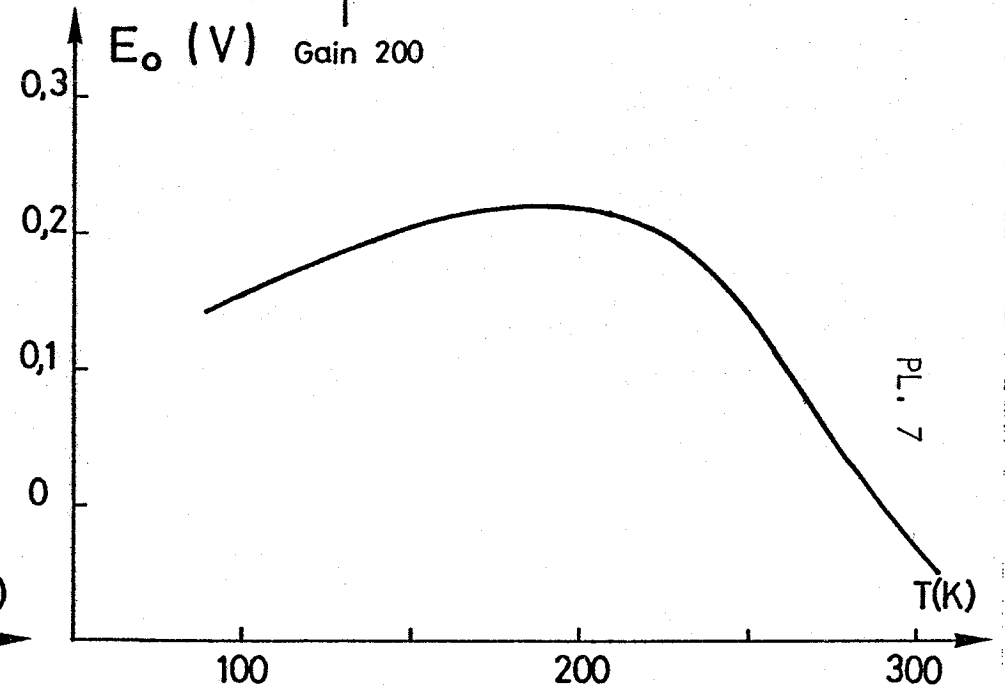
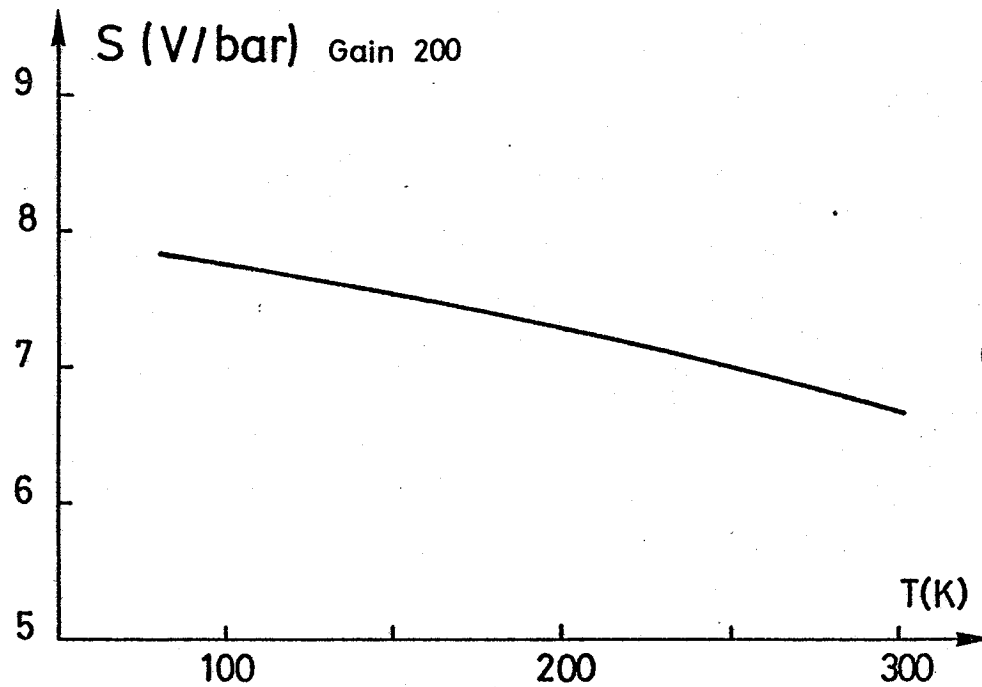
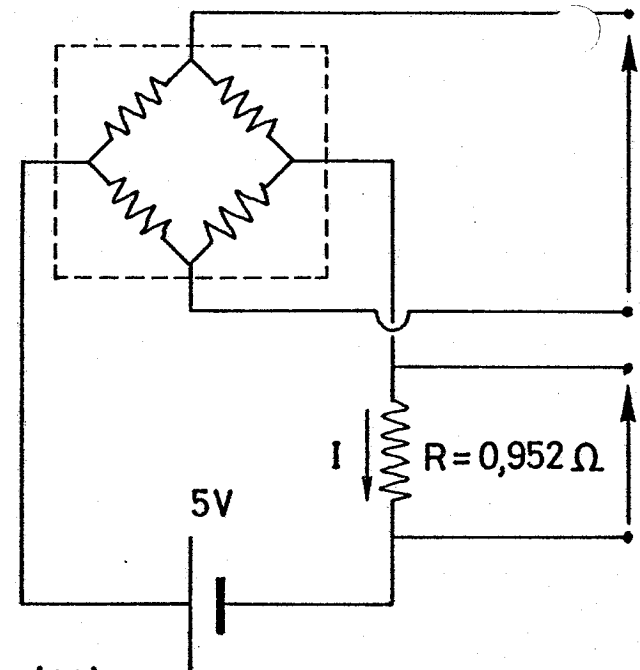
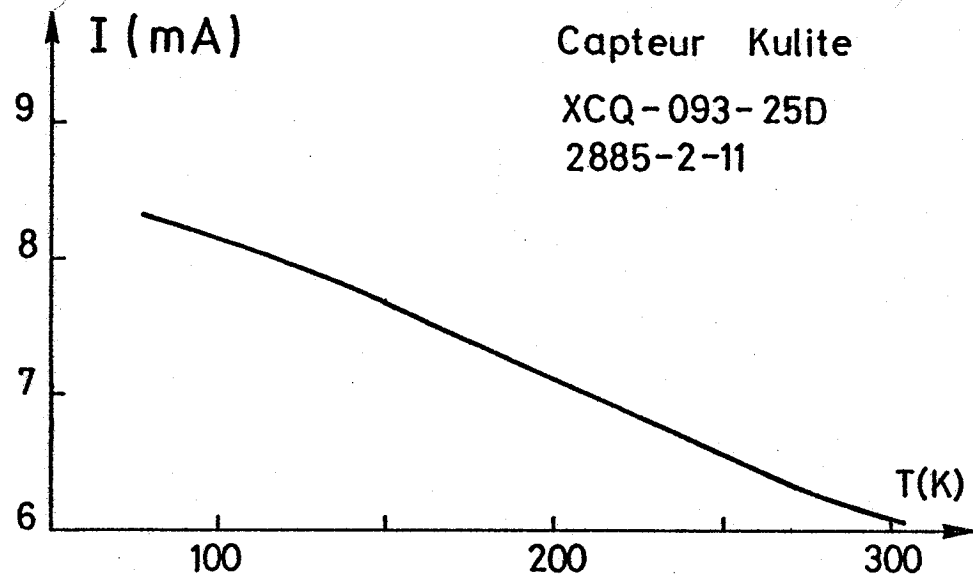
Pl. 5 - Evolution des paramètres de commande et de fonctionnement de la soufflerie T2 au cours de la rafale cryogénique de caractéristiques  $T_i = 95 \text{ K}$ ,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$



(K1) Montage avec joint torique (Echelle: 5)  
(Kulite XCQ-093-25D 2885-2-11)

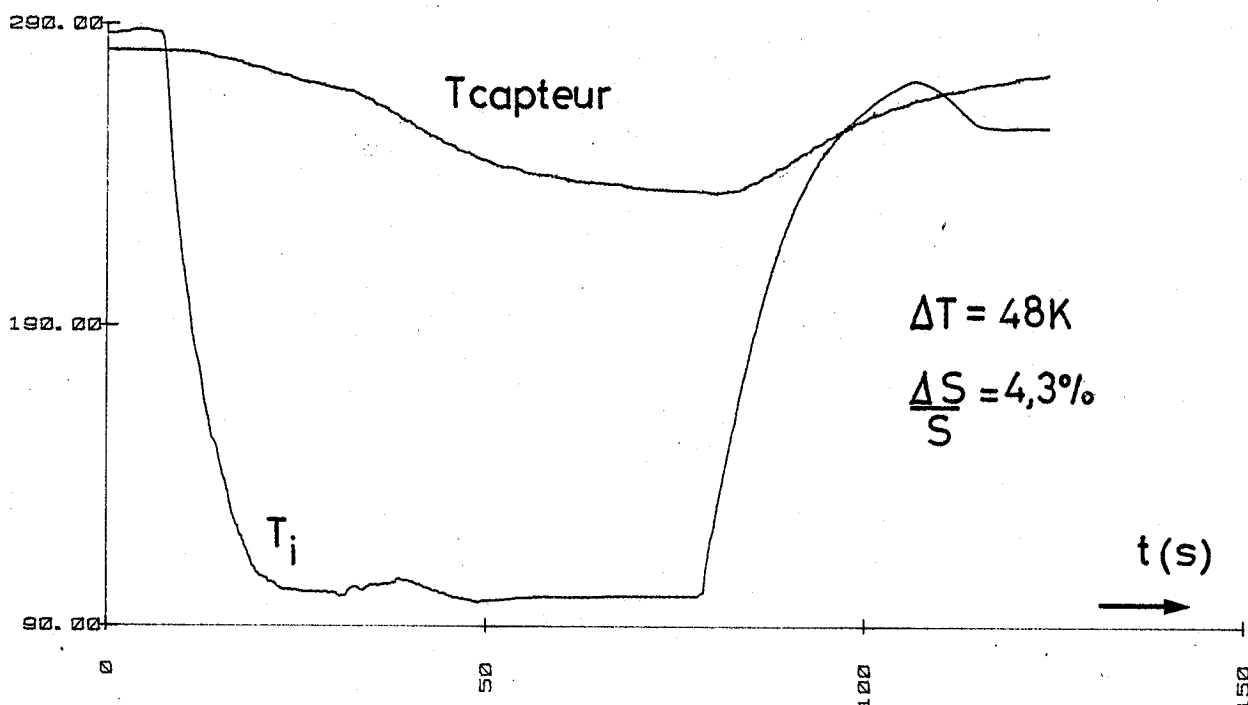
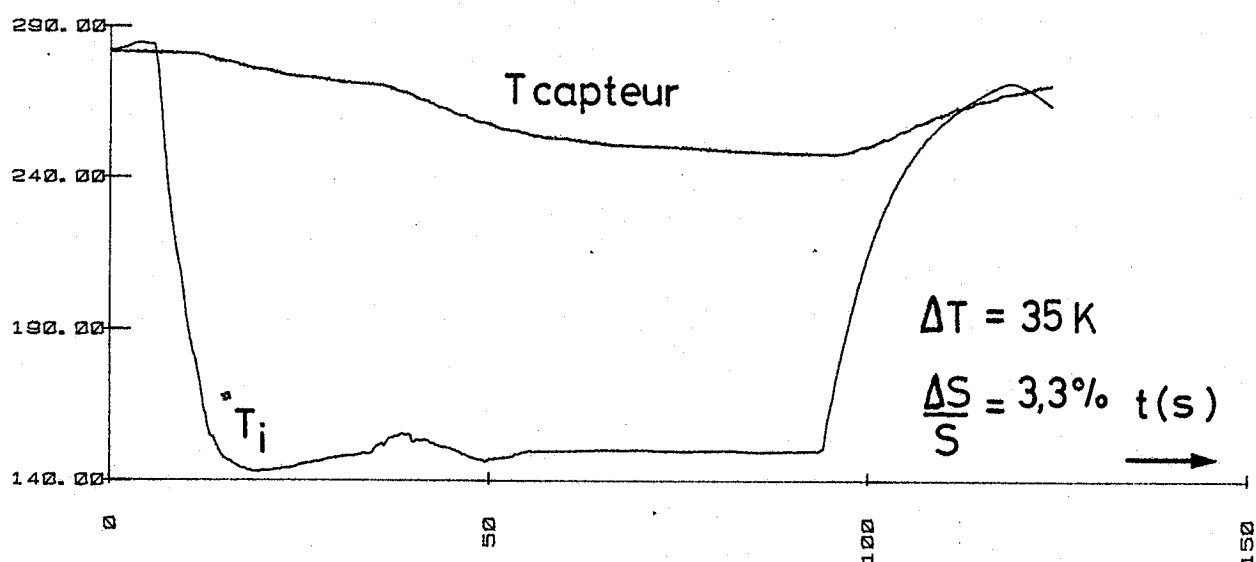
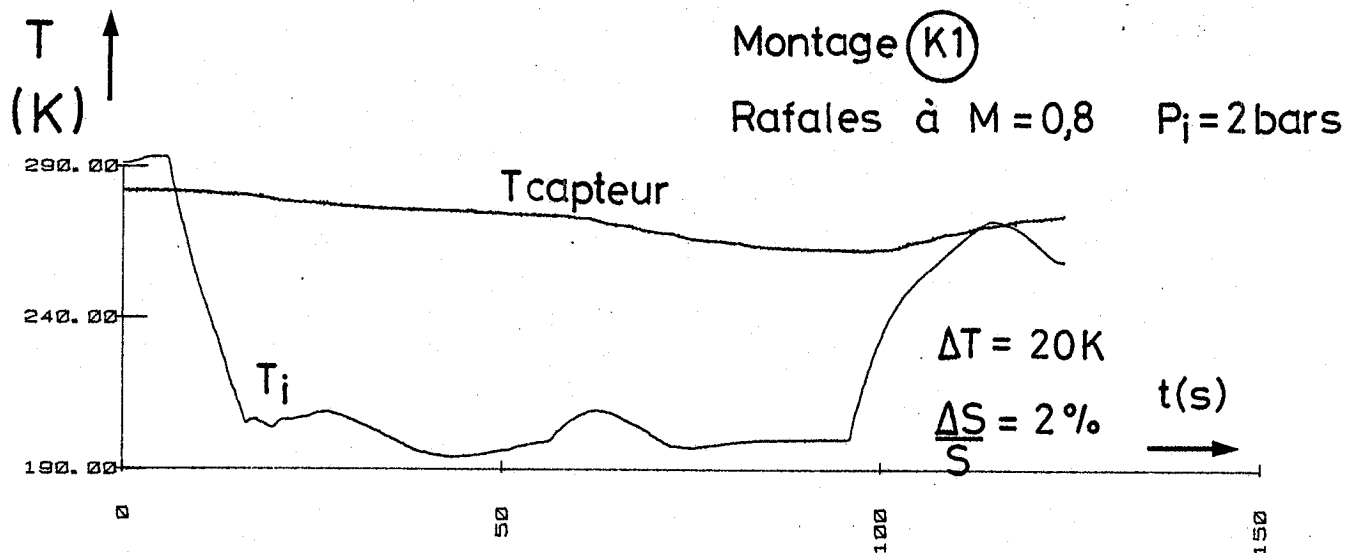


(K2) Montage dans hublot en plexiglas (Echelle: 1)

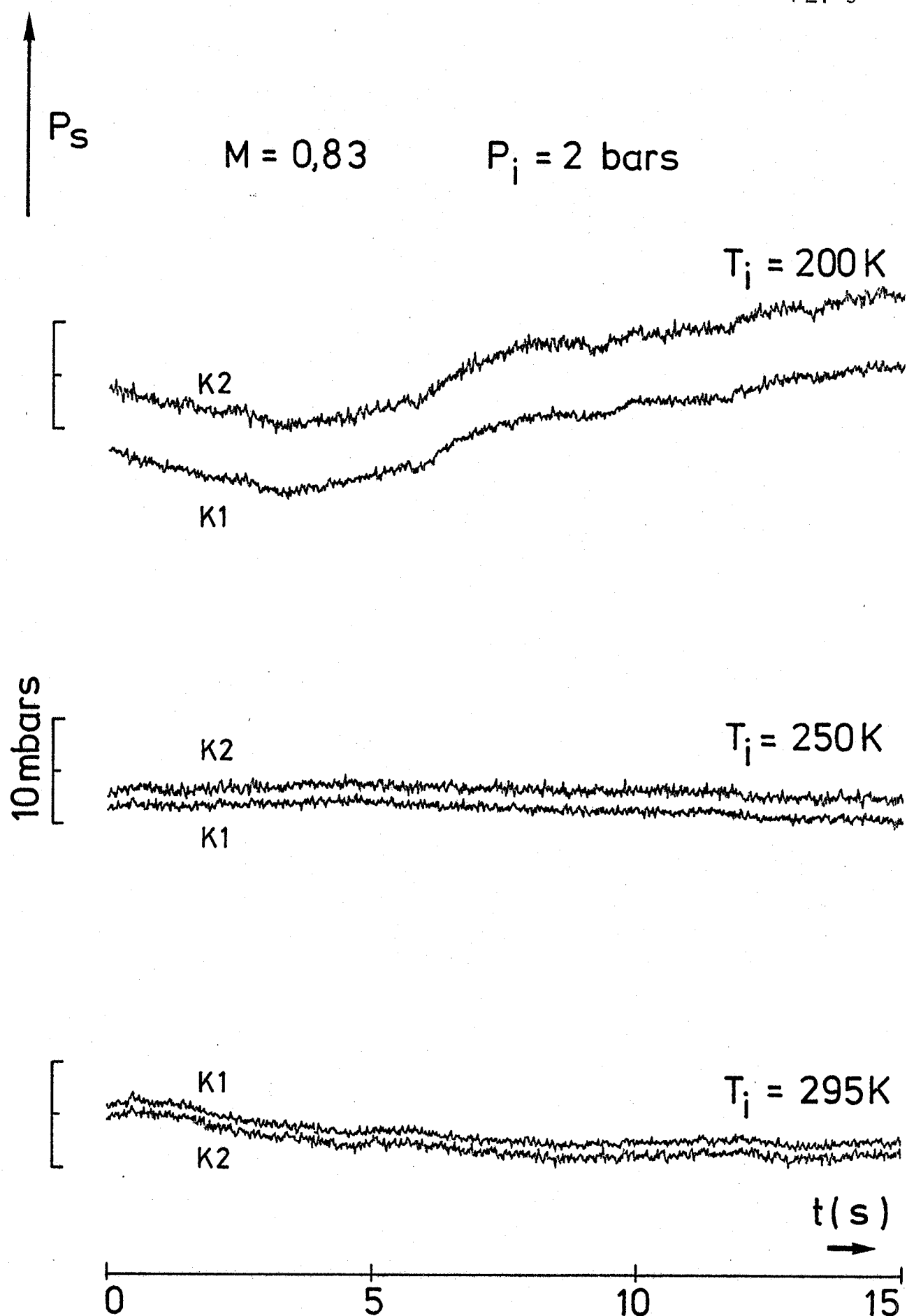


PL. 7 : Variation de la sensibilité, de l'impédance interne et de l'indication à pression nulle du capteur Kulite KI, en fonction de sa température.

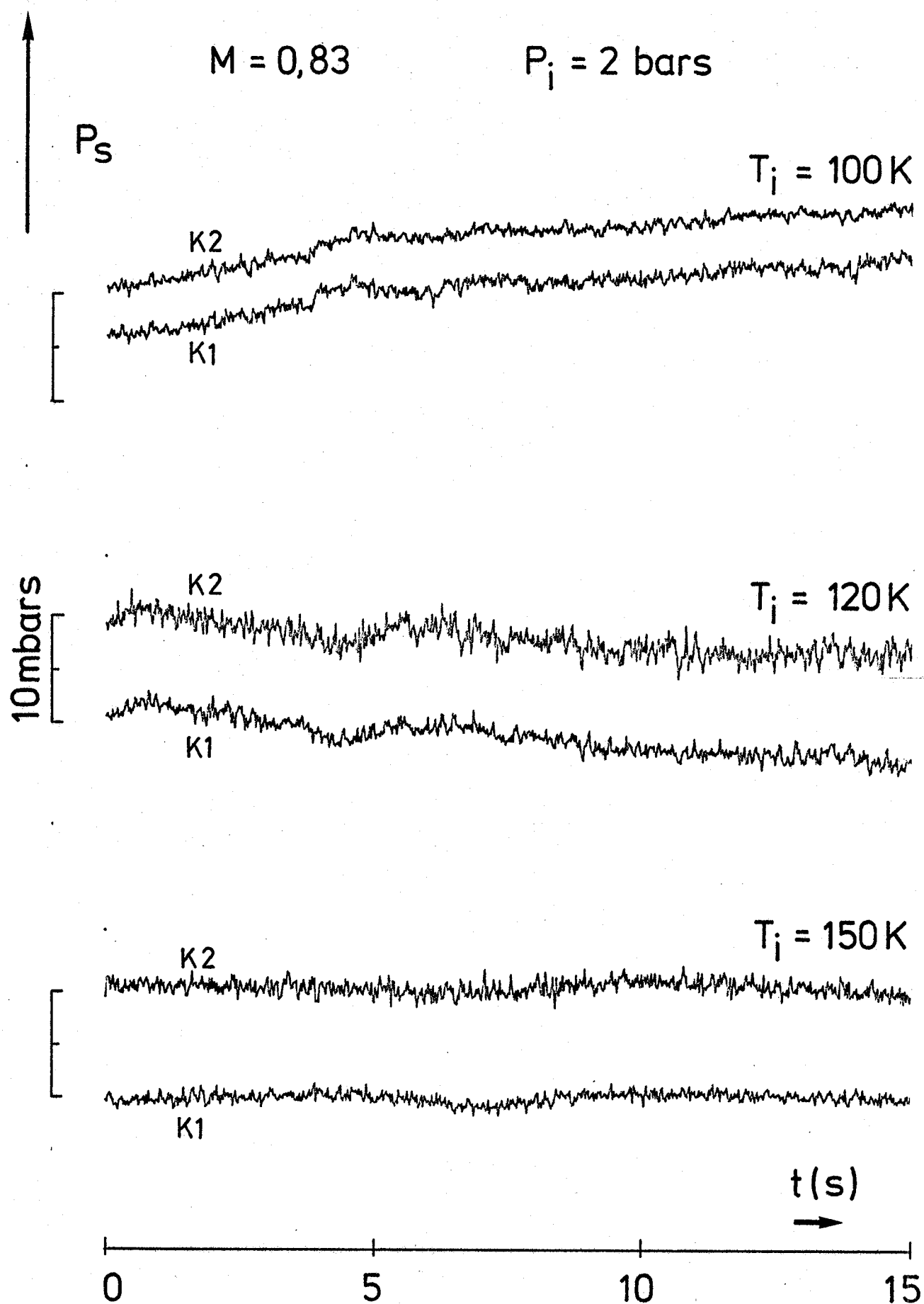




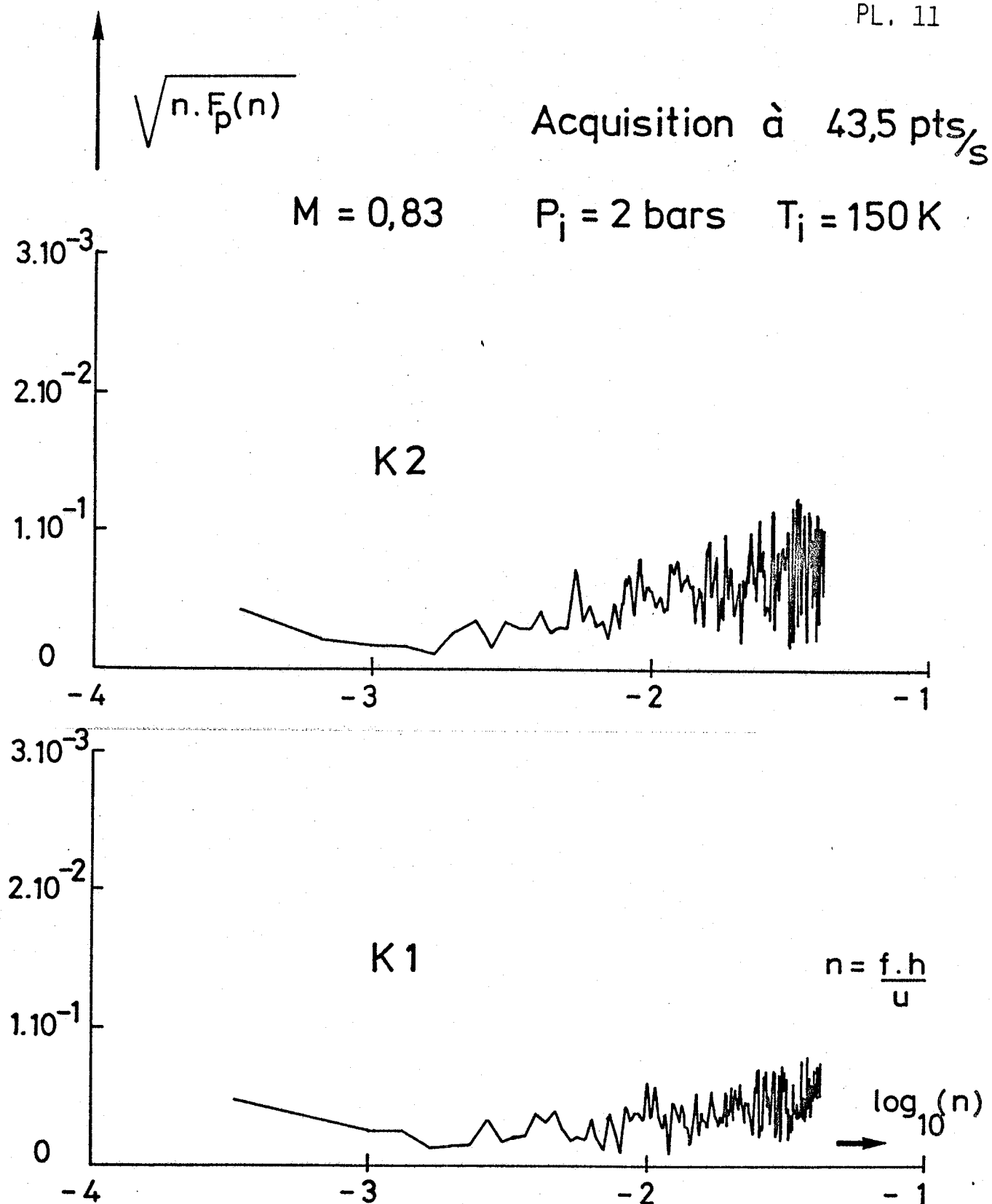
PL. 8 : Exemples de refroidissement d'un capteur Kulite monté à la paroi de la veine (montage K1) au cours de rafales cryogéniques à  $M = 0,8$  et à divers niveaux de température.



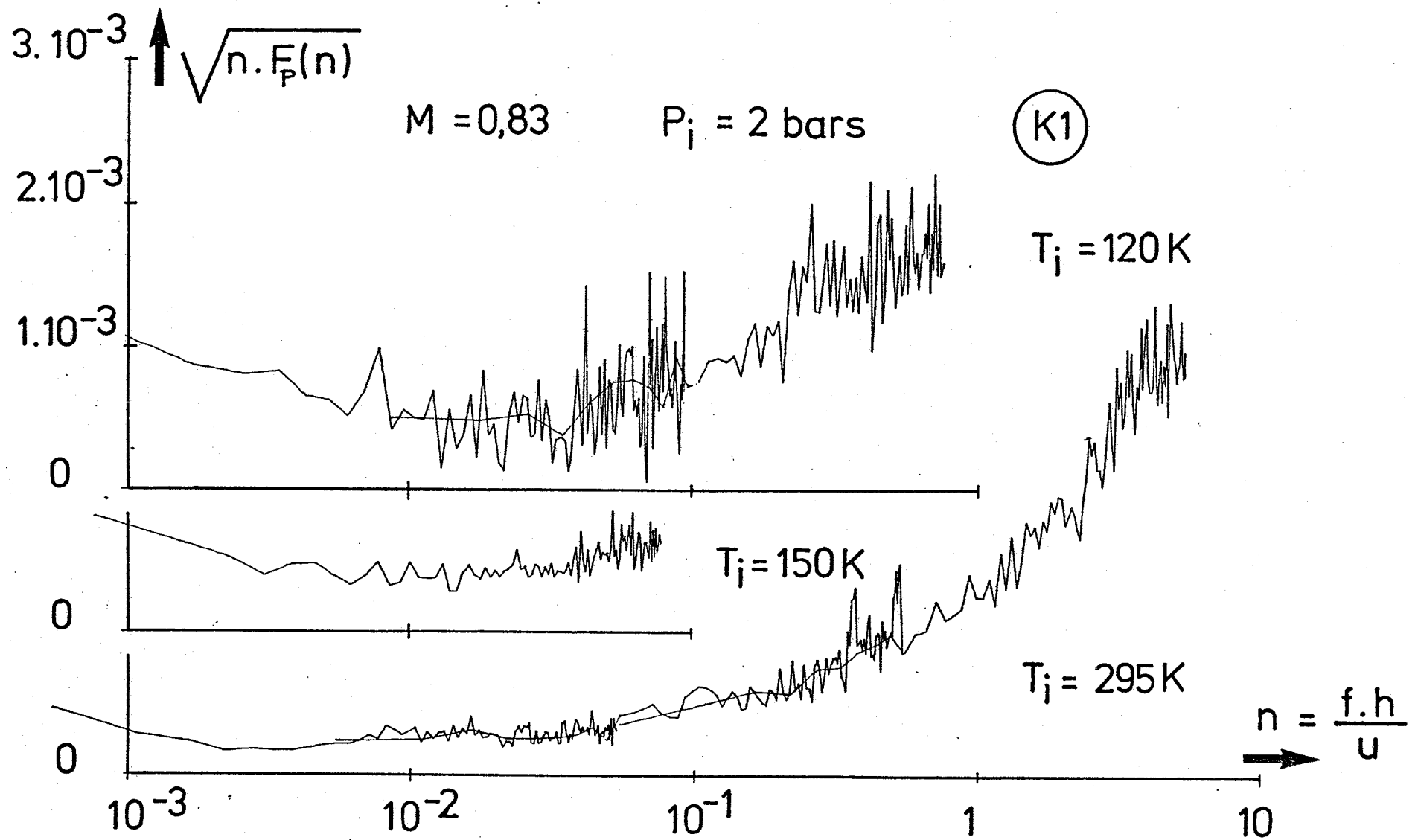
PL. 9 : Signaux de pression mesurés par les capteurs Kulite à la paroi au cours d'essais à  $M = 0,8$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  et à diverses températures génératrices le col aval de la veine étant amorcé.



PL. 10 : Signaux de pression mesurés par les capteurs Kulite à la paroi au cours d'essais à  $M = 0,8$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  et à diverses températures génératrices, le col aval de la veine étant amorcé.

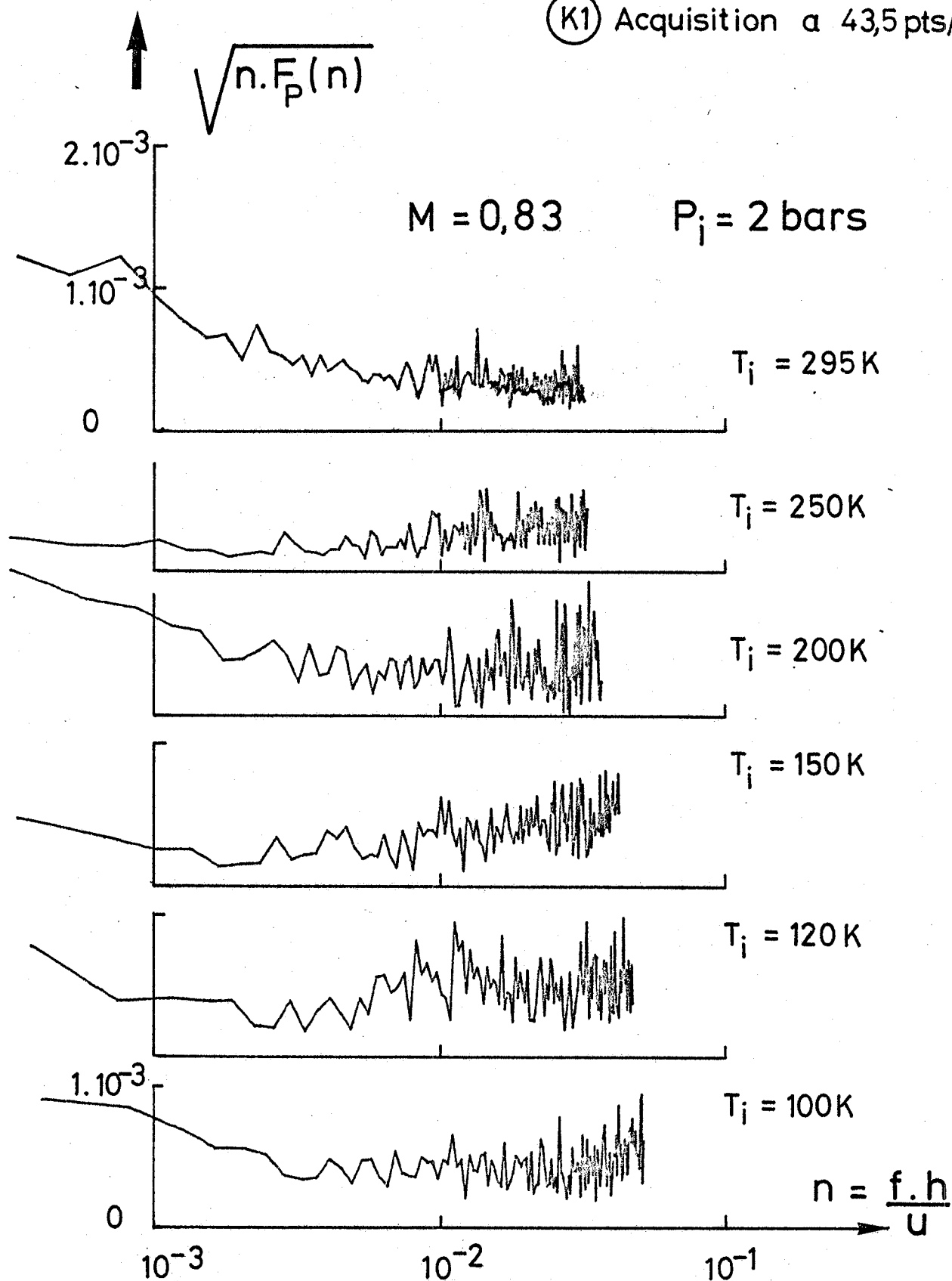


PL. 11 : Comparaison des spectres de fluctuation de pression à basse fréquence, obtenus par les montages K1 et K2 au cours d'un essai à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  et  $T_i = 150 \text{ K}$ .

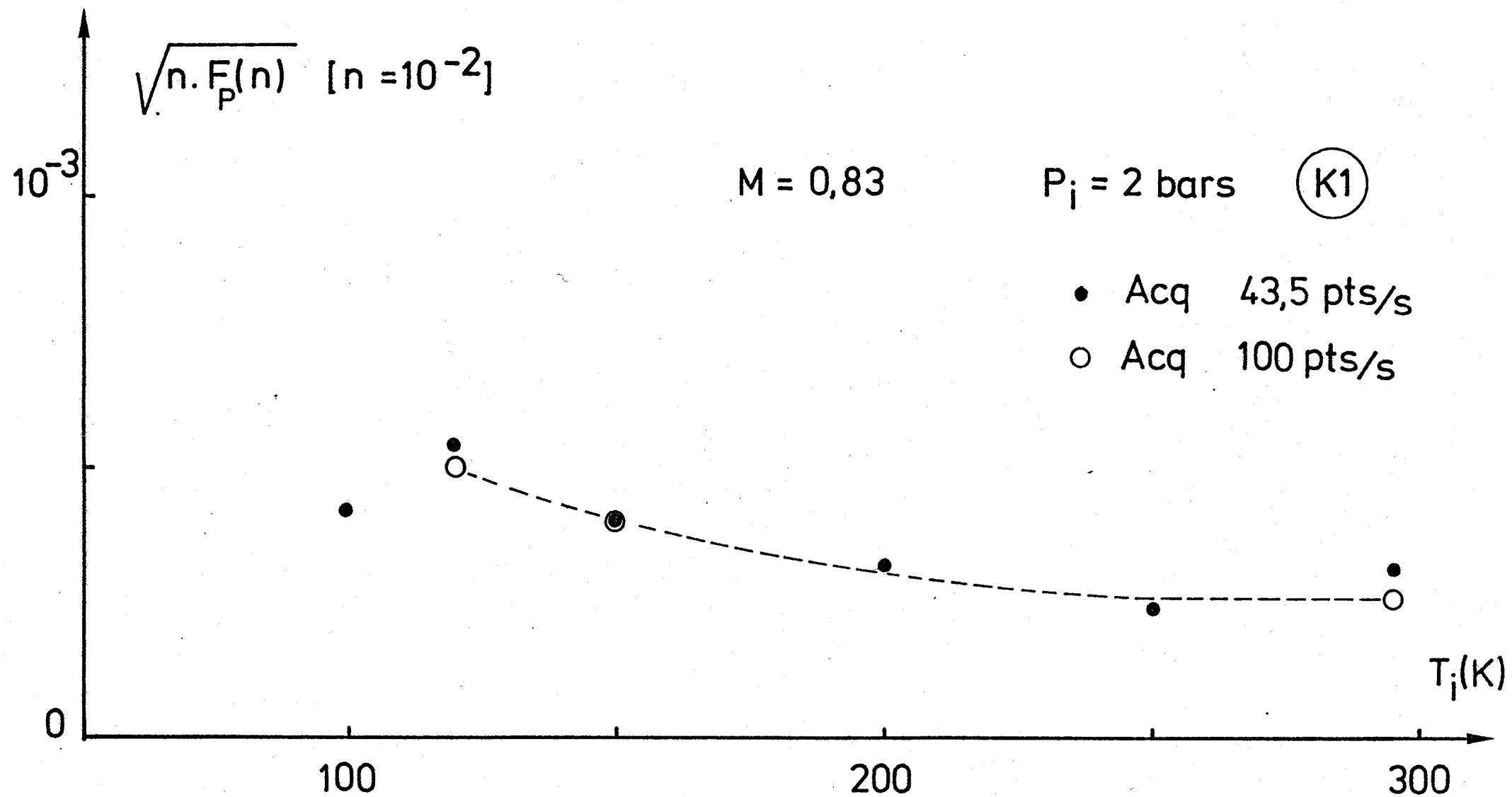


PL. 12 : Ensemble des spectres de fluctuation de pression mesurés avec le montage K1 aux températures d'essai  $T_i = 120 \text{ K}$ ,  $T_i = 150 \text{ K}$  et  $T \text{ Ambiante}$ , pour  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ , le col aval étant amorcé.

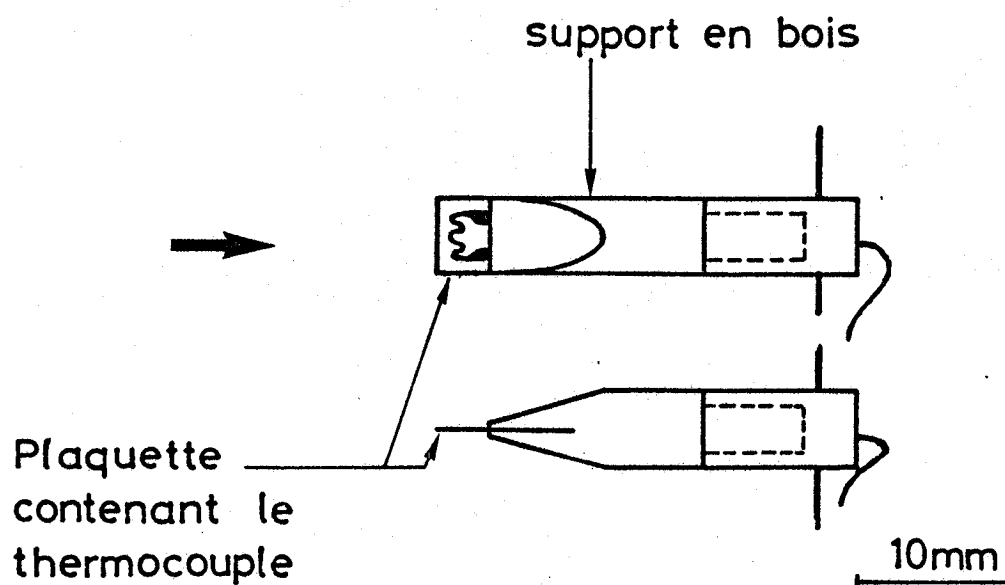
(K1) Acquisition à 43,5 pts/s



PL. 13 : Ensemble des spectres de fluctuation de pression à basse fréquence, mesurés avec le montage K1, à diverses températures d'essai, pour  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ .



PL. 14 : Evolution du niveau de fluctuation de pression à basse fréquence en fonction de la température de l'essai, à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ .

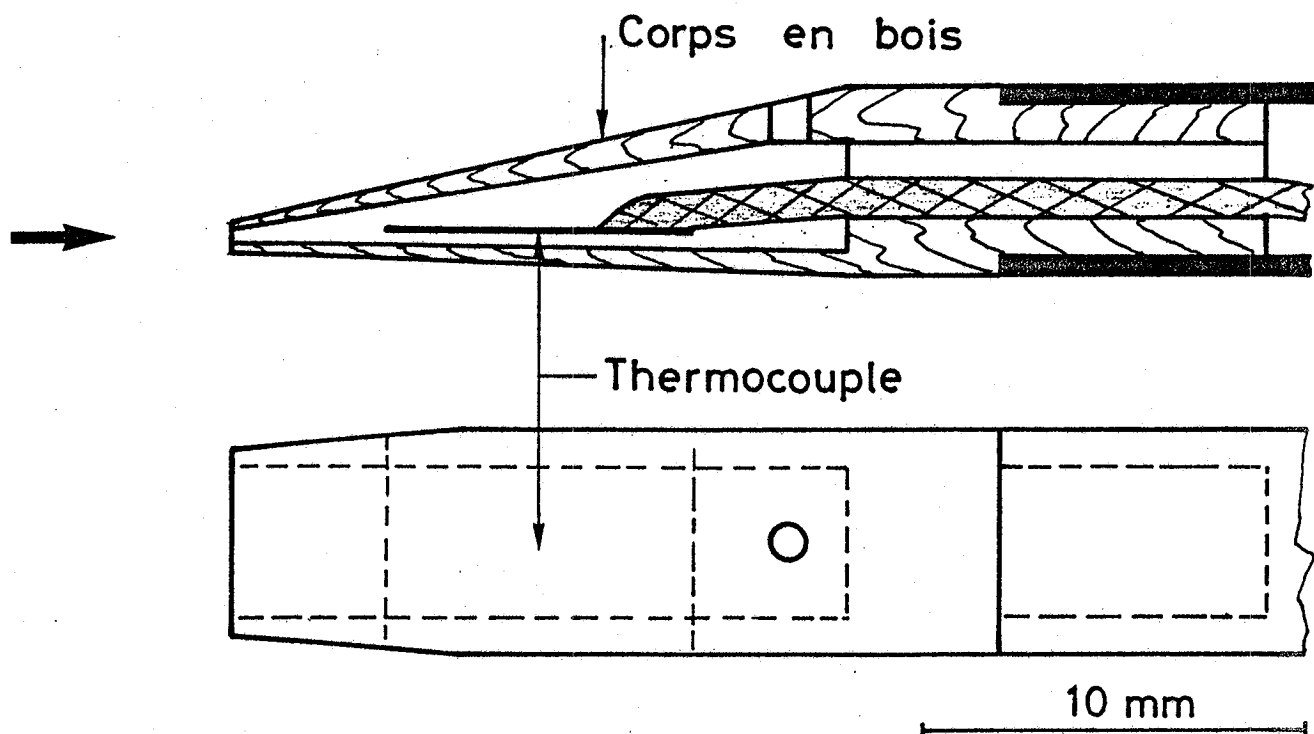


A) SONDE "DE RECUPERATION"

Chambre de tranquillisation     $T_i$   
 Veine d'essai     $T_{isr}$

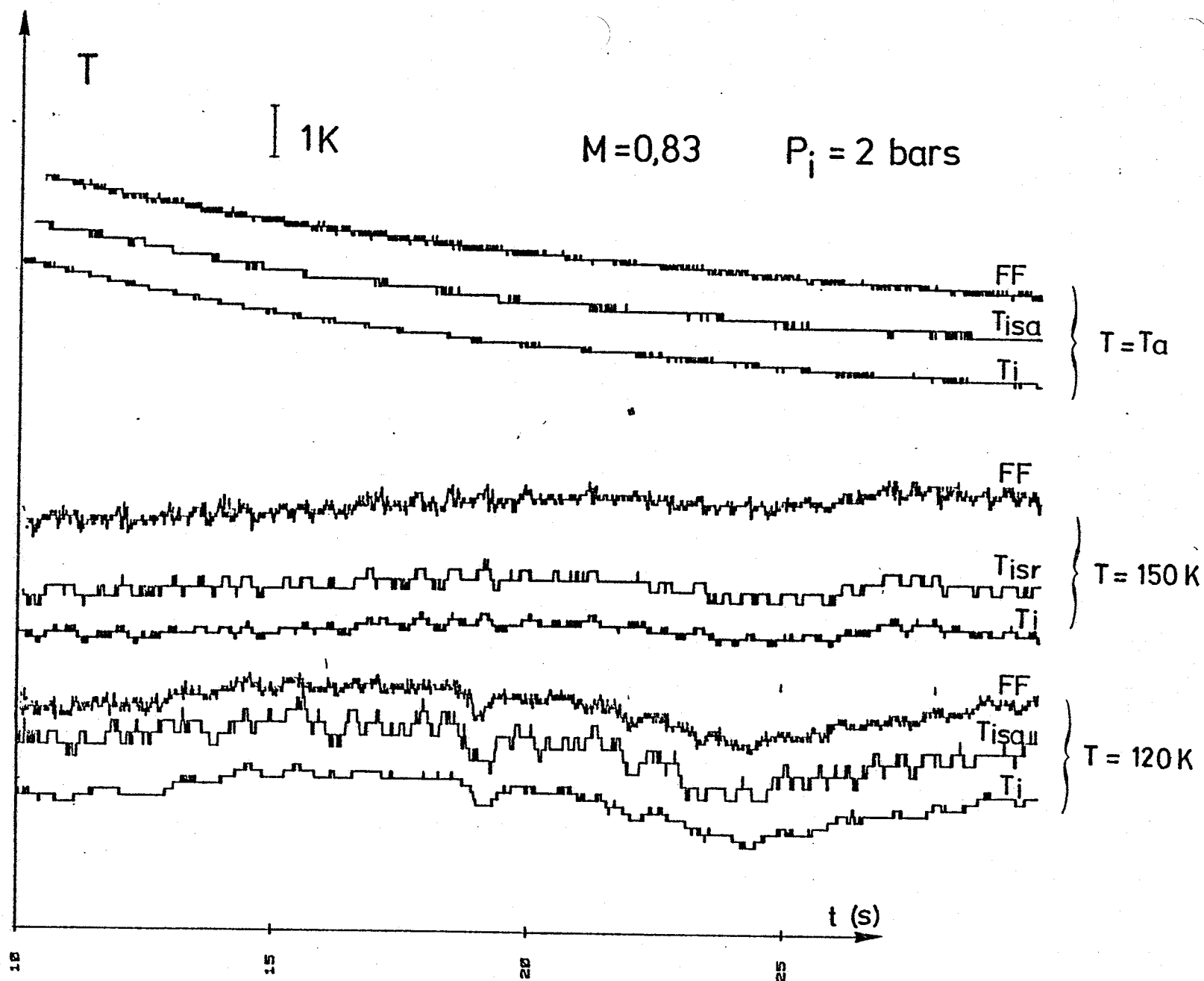
B) SONDE D'ARRET

Veine d'essai     $T_{isa}$

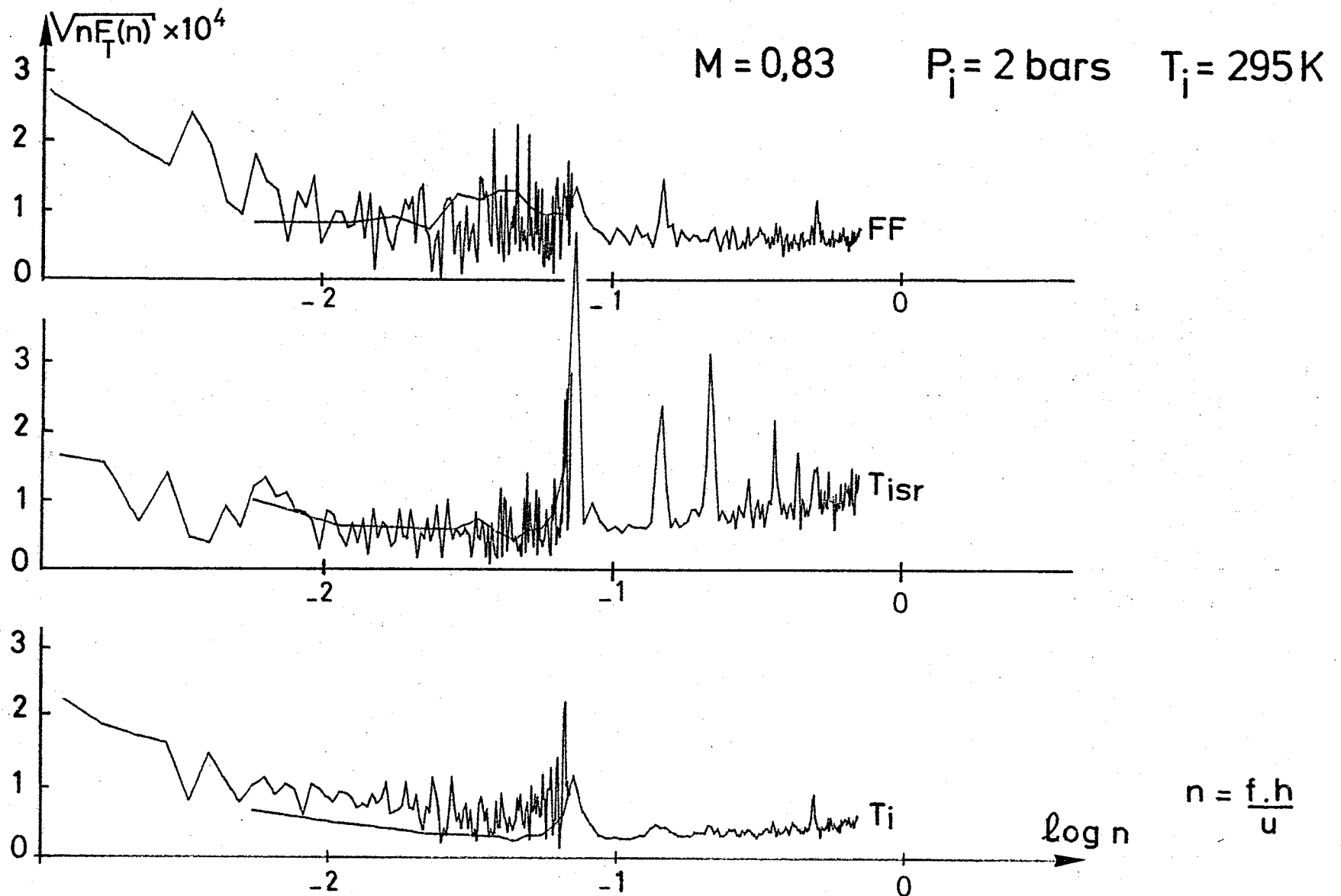


PL. 15 : Schéma et notation des sondes de température à thermocouple  
 RdF Cuivre-Constantan.

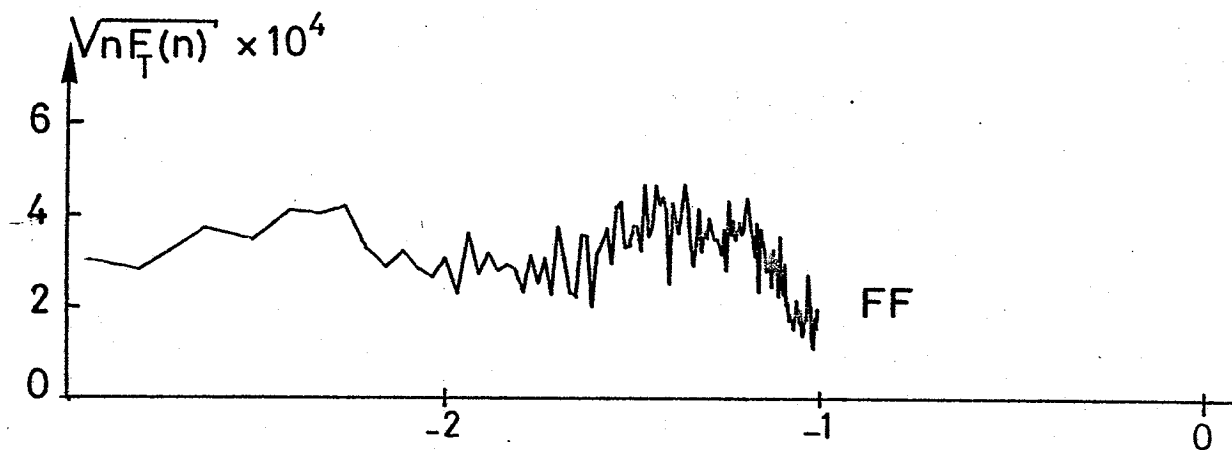




PL. 16 : Signaux de température mesurés par le fil froid de diamètre  $9 \mu$  et les sondes à thermocouple au cours d'essais à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ , aux températures génératrices  $T_i = 120 K$ ,  $T_i = 150 K$  et  $T$  Ambiante.



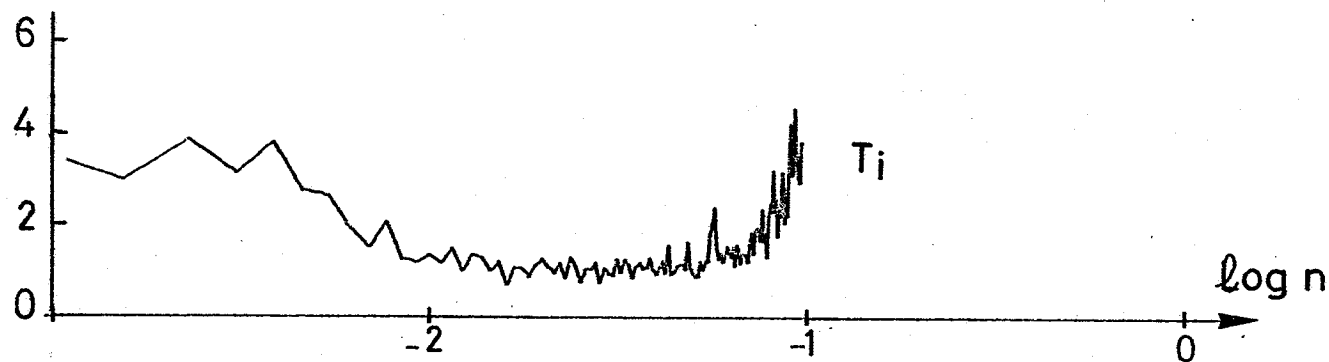
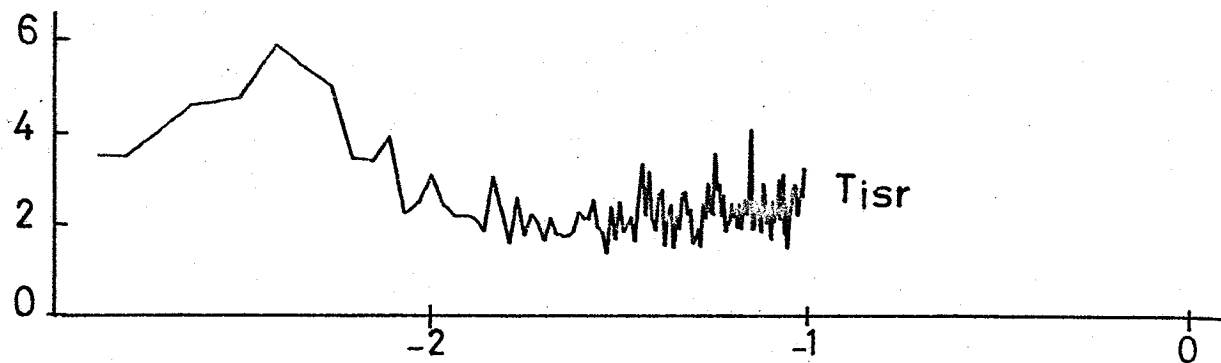
PL. 17 : Spectres de fluctuation de température obtenus à température ambiante,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars, avec différents moyens de mesure.



$$M = 0,83$$

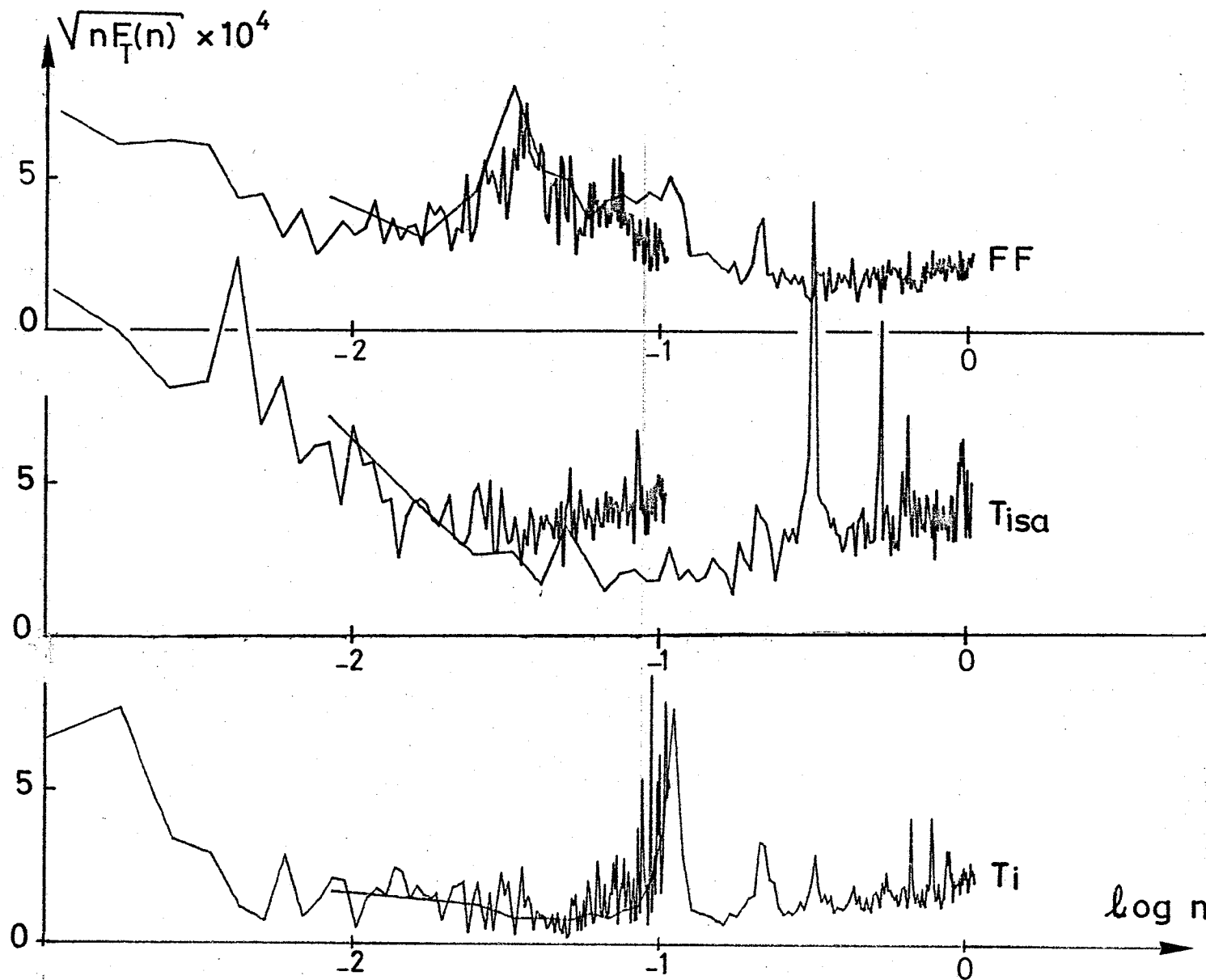
$$P_i = 2 \text{ bars}$$

$$T_i = 150 \text{ K}$$



$$n = \frac{f \cdot h}{u}$$

PL. 18 : Spectres de fluctuation de température obtenus à  $T_i = 150 \text{ K}$ ,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ , avec différents moyens de mesure.

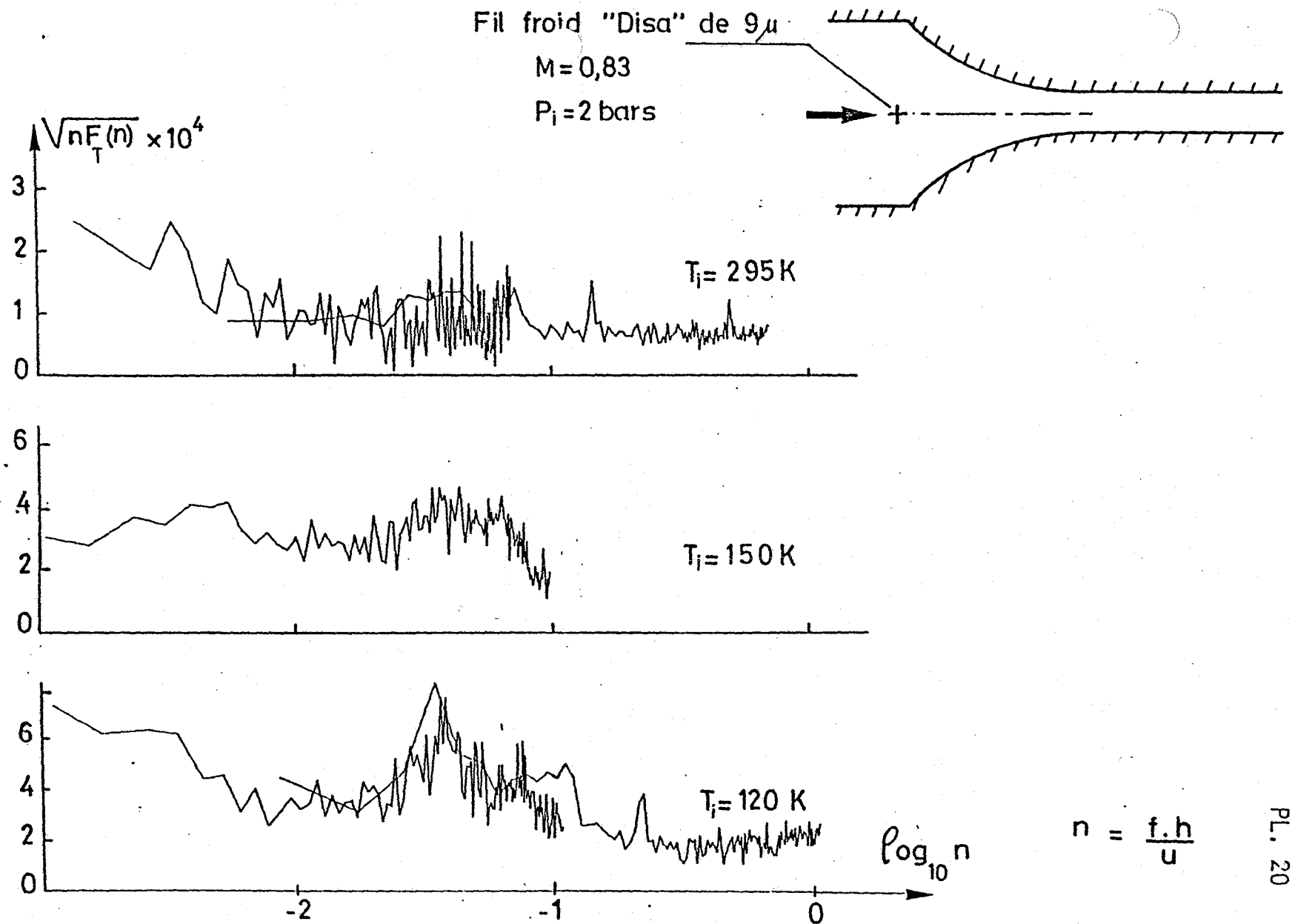


$M = 0,83$   
 $P_i = 2 \text{ bars}$   
 $T_i = 120 \text{ K}$

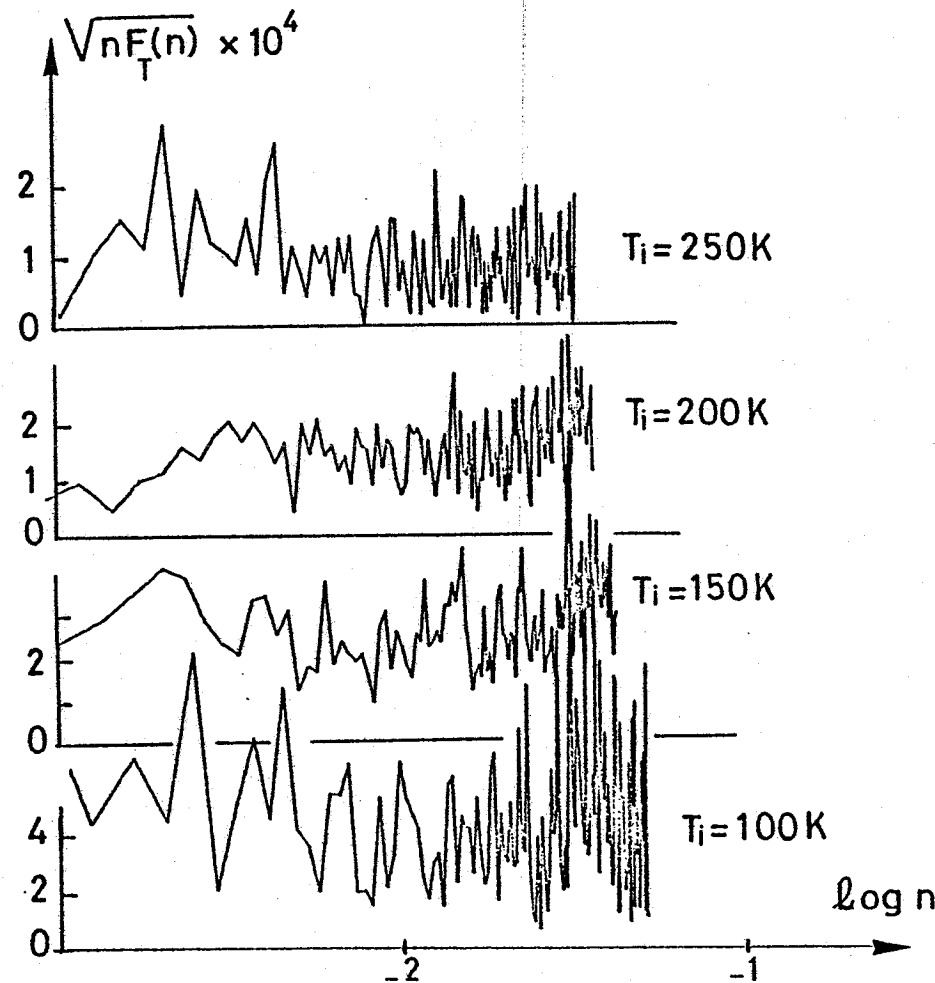
$$n = \frac{f \cdot h}{u}$$

PL. 19

PL. 19 : Spectres de fluctuation de température obtenus à  $T_i = 120 \text{ K}$ ,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ , avec différents moyens de mesure.



PL. 20 : Regroupement de l'ensemble des spectres de fluctuation de température mesurés grâce au fil froid ( $\emptyset = 9 \mu$ ) aux températures génératrices 120 K, 150 K et 295 K, à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ .



Fil froid "DISA"  $\varnothing 9\mu$

$M = 0,83$

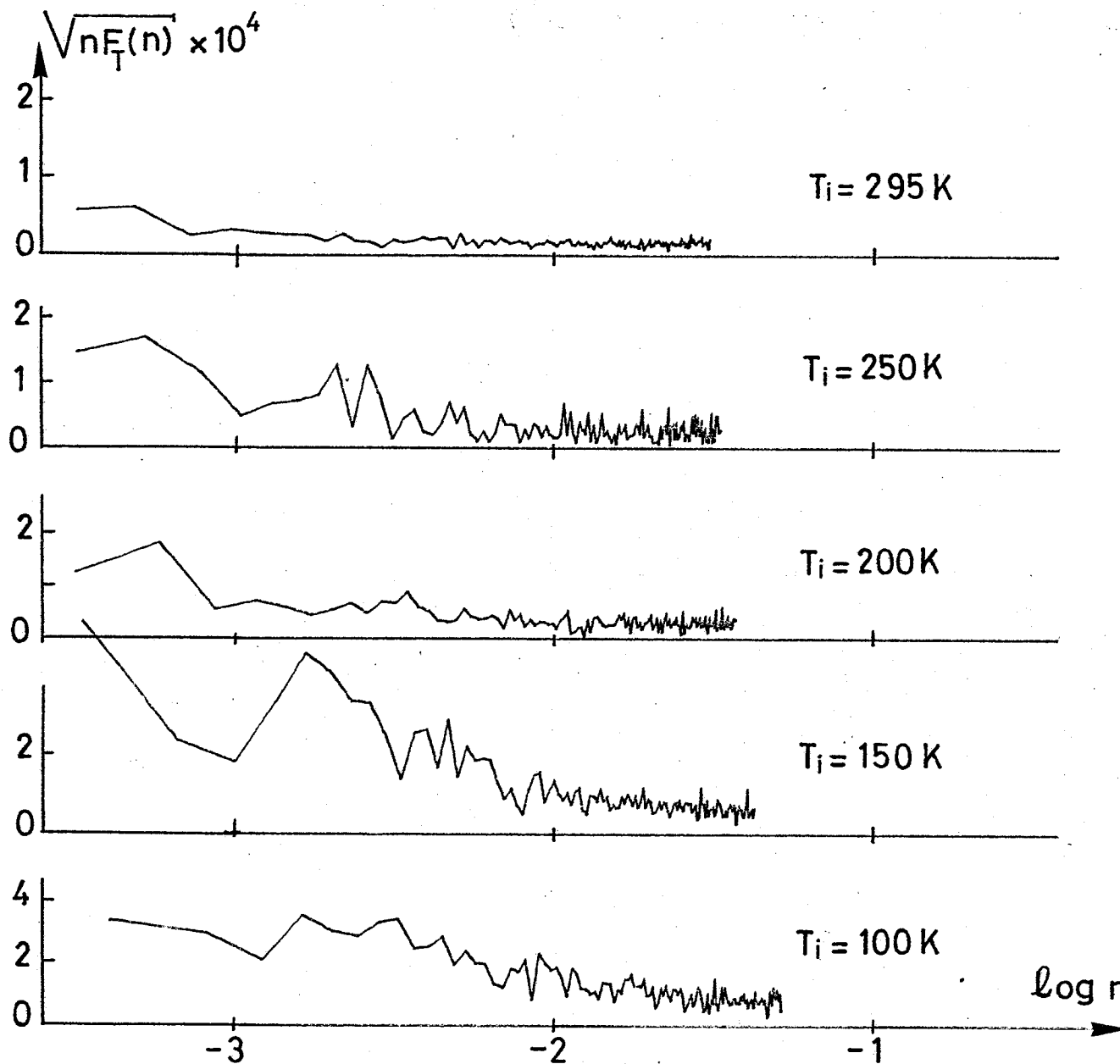
$P_i = 2 \text{ bars}$

Acquisition à 43,5 pts/s

$$n = \frac{f \cdot h}{u}$$

PL. 21

PL. 21 : Exemples de spectres de fluctuation de température mesurés à basse fréquence par le fil froid, à divers niveaux de température, à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ .



$M = 0,83$

$P_i = 2 \text{ bars}$

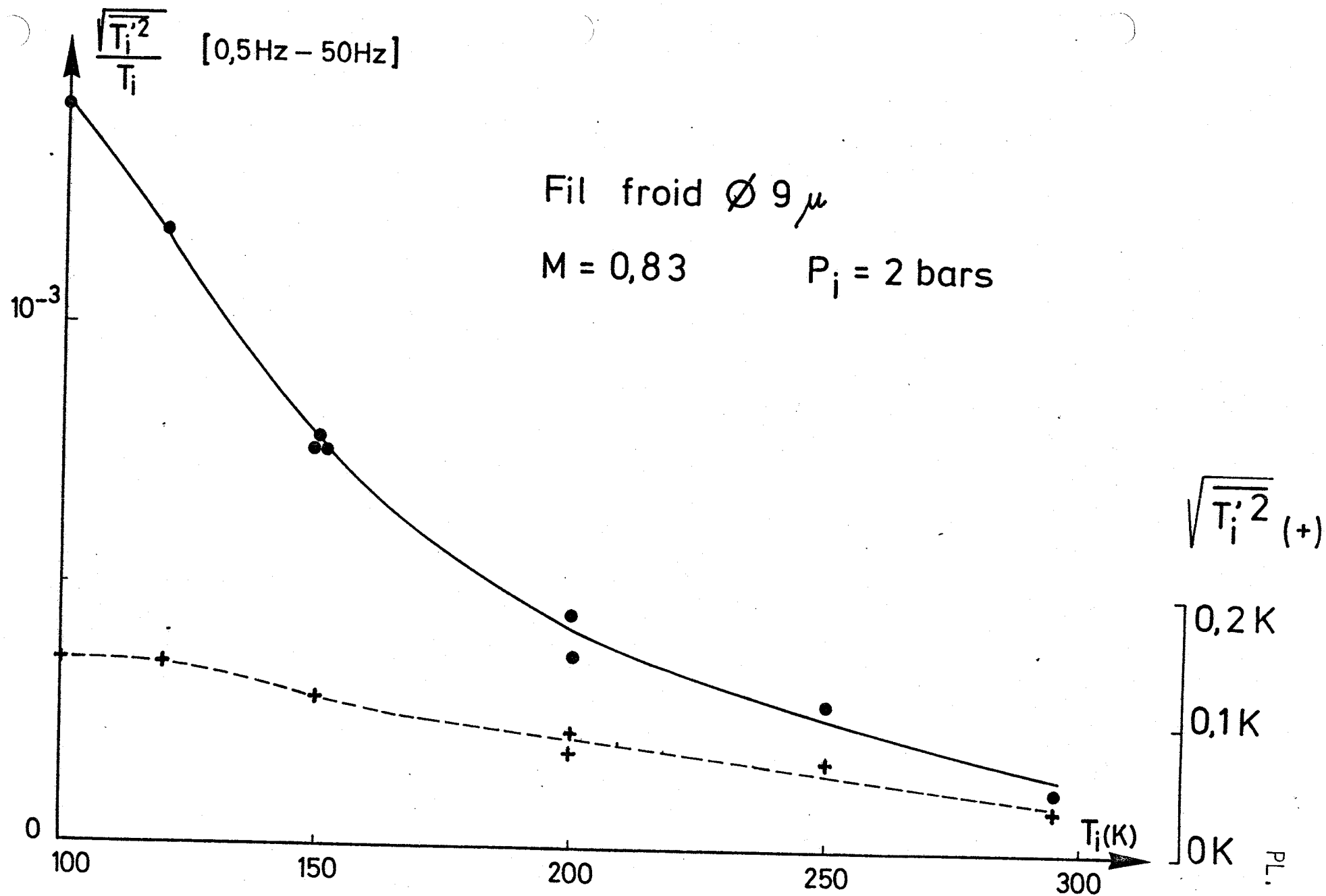
$T_i$ : thermocouple  
dans la chambre

Acquisition à 43,5 pts/s

$$n = \frac{f \cdot h}{u}$$

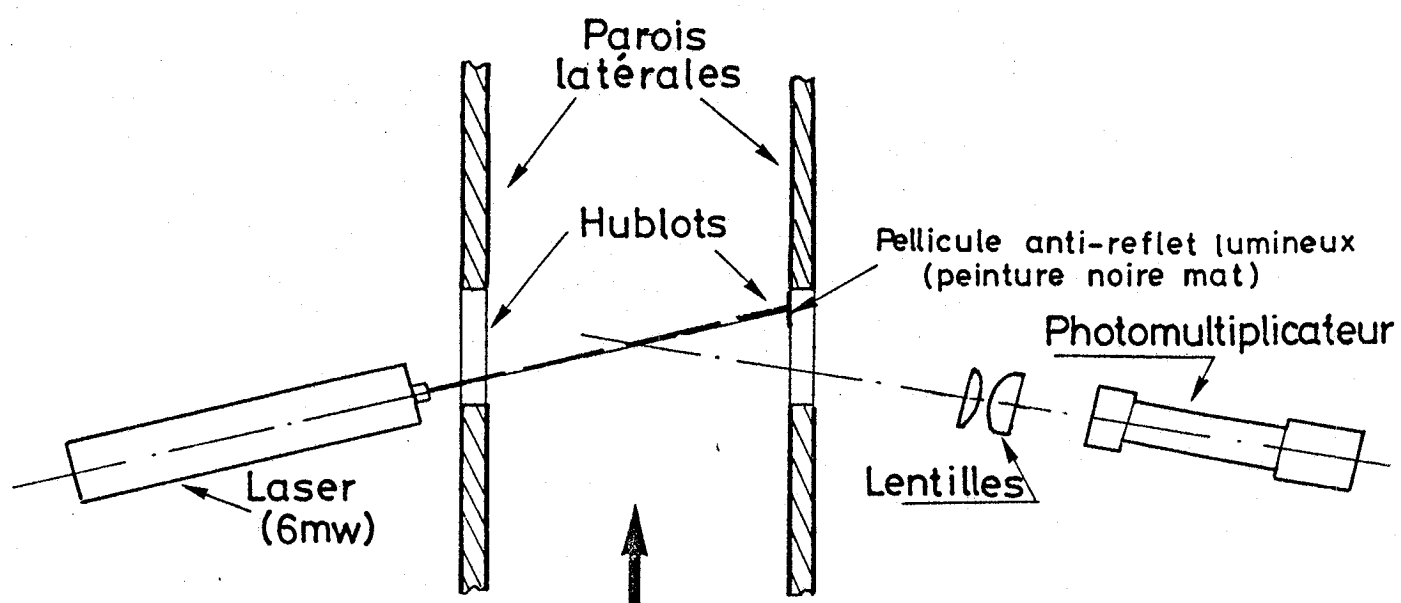
PL. 22

PL. 22 : Exemples de spectres de fluctuation de température, obtenus à basse fréquence avec la sonde à thermocouple mesurant  $T_i$  dans la chambre de tranquillisation, à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  et à divers niveaux de température.

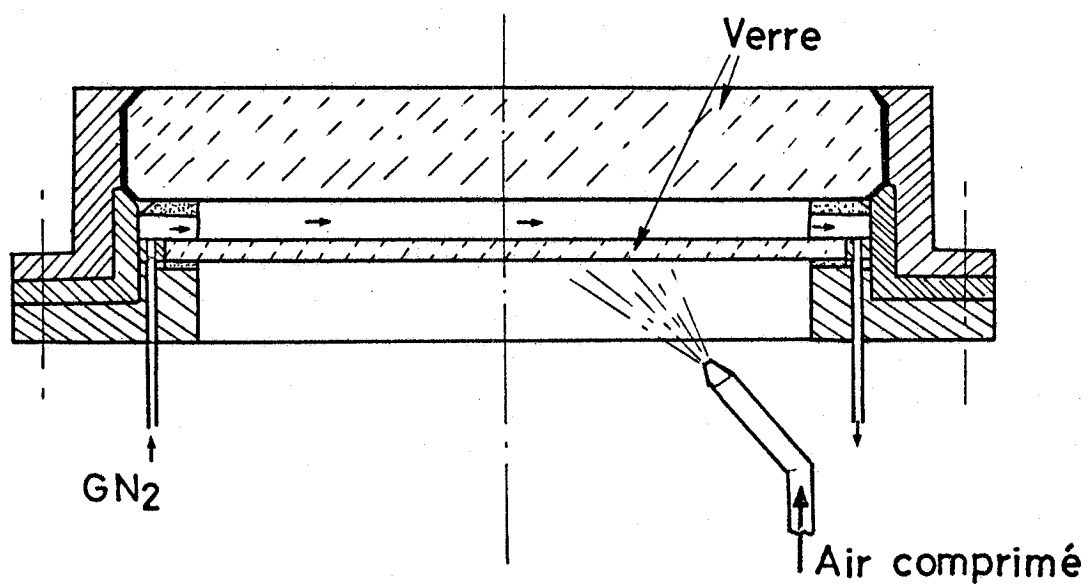


PL. 23 : Evolution du niveau quadratique moyen de fluctuation de température, en valeur relative et en valeur absolue, en fonction de la température de l'essai, à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2$  bars.

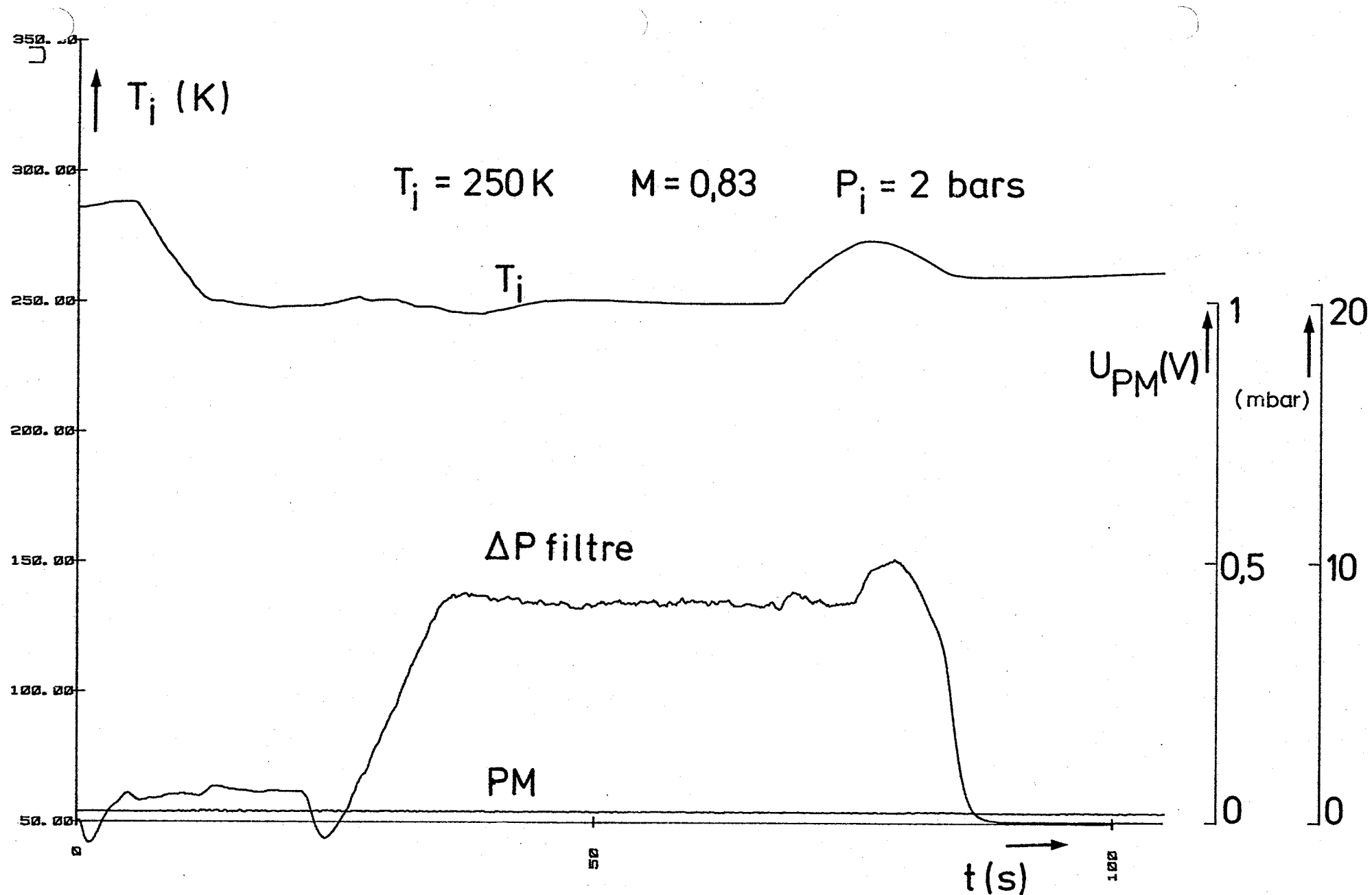




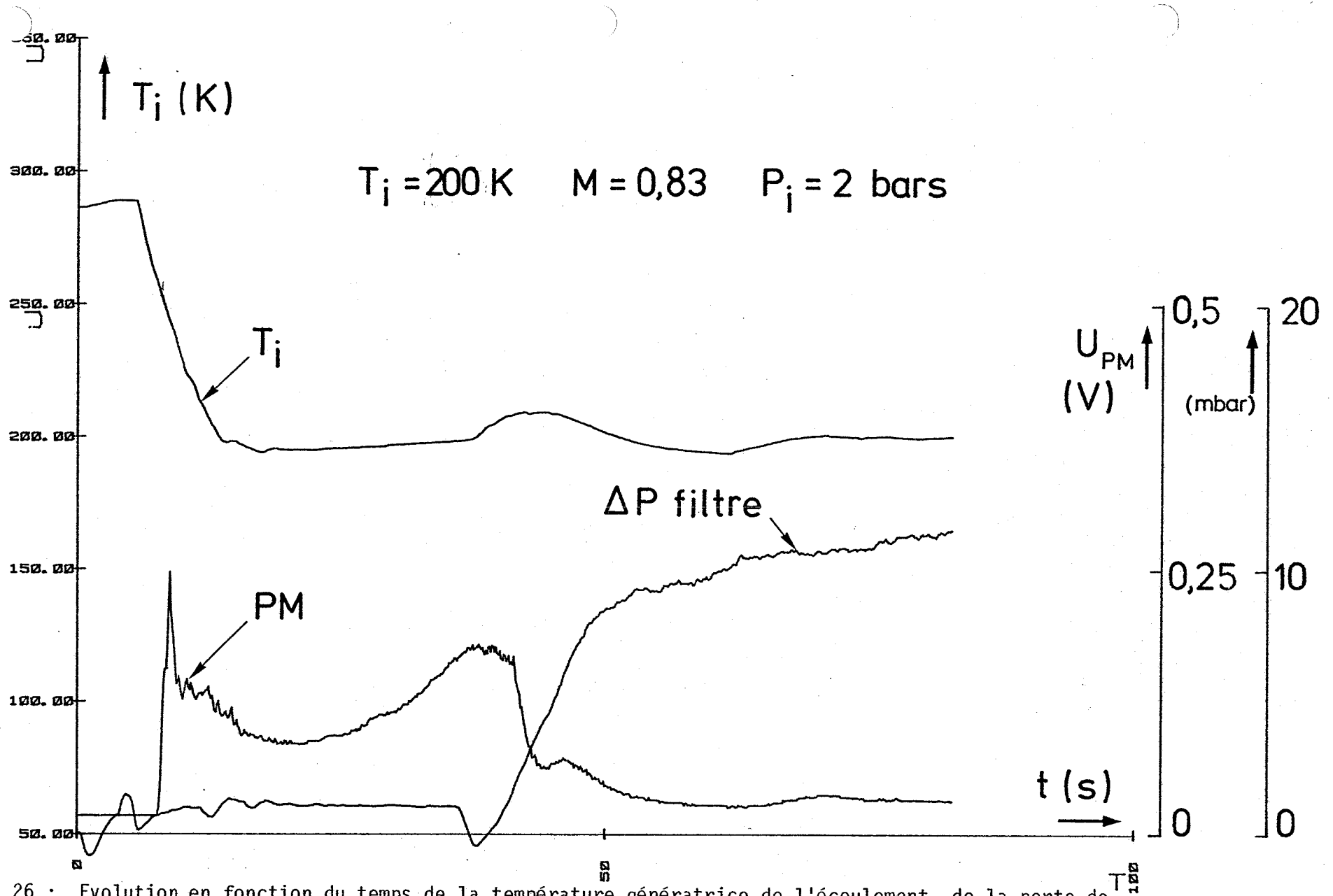
### Détail des Hublots



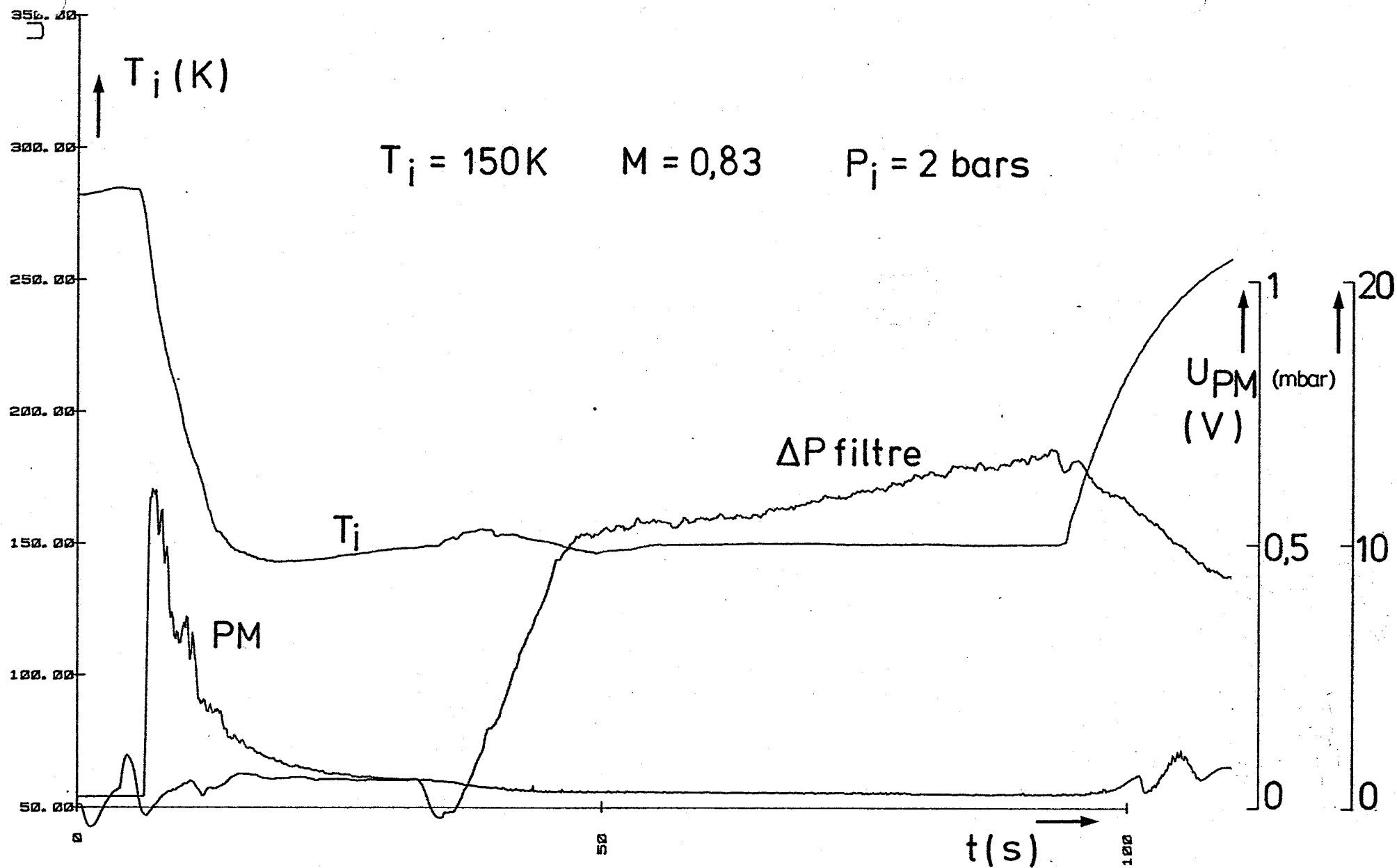
PL. 24 : Schéma du dispositif optique de détection de particules.



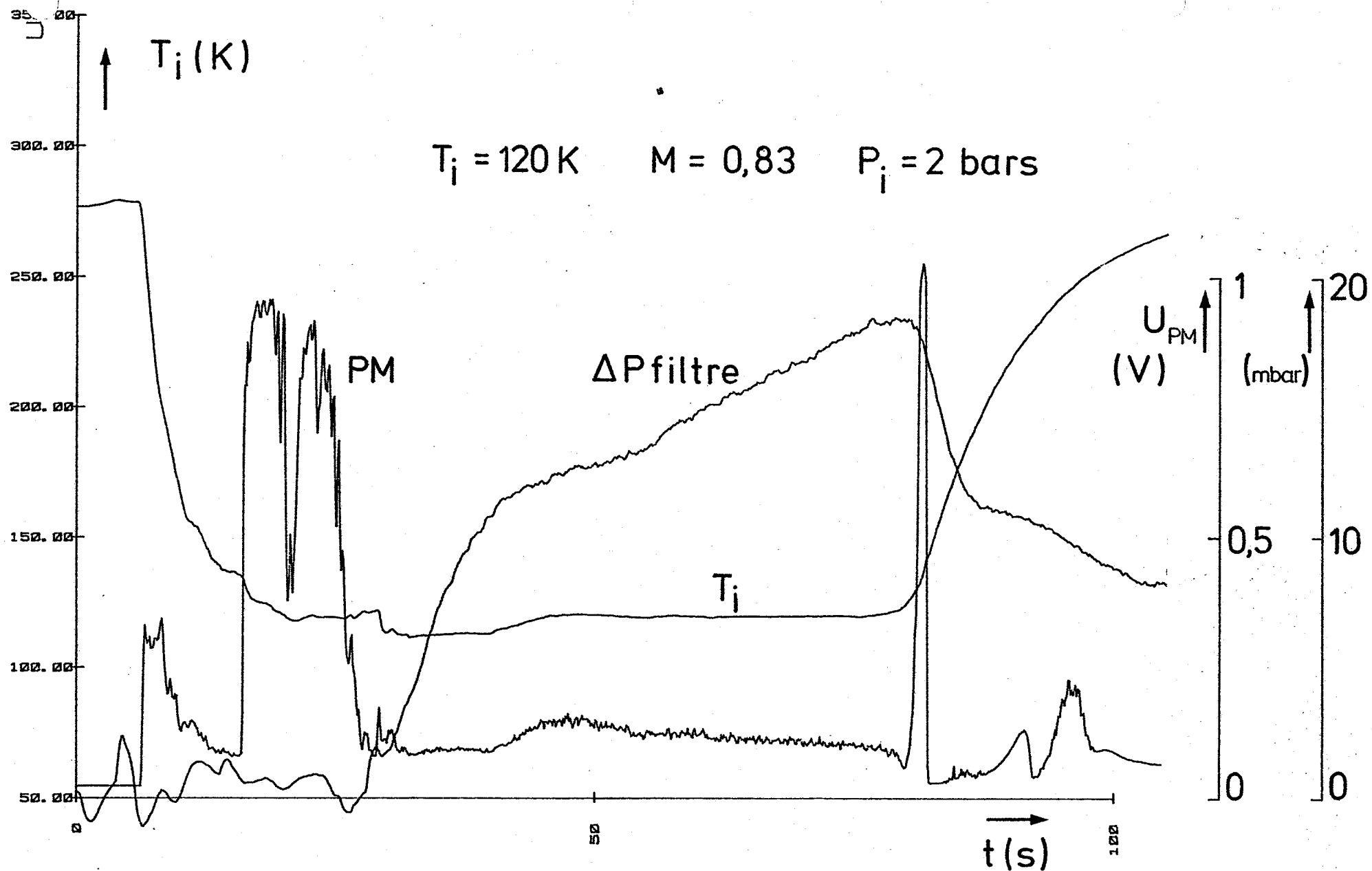
PL. 25 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une ralale cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  et  $T_i = 250 \text{ K}$ .



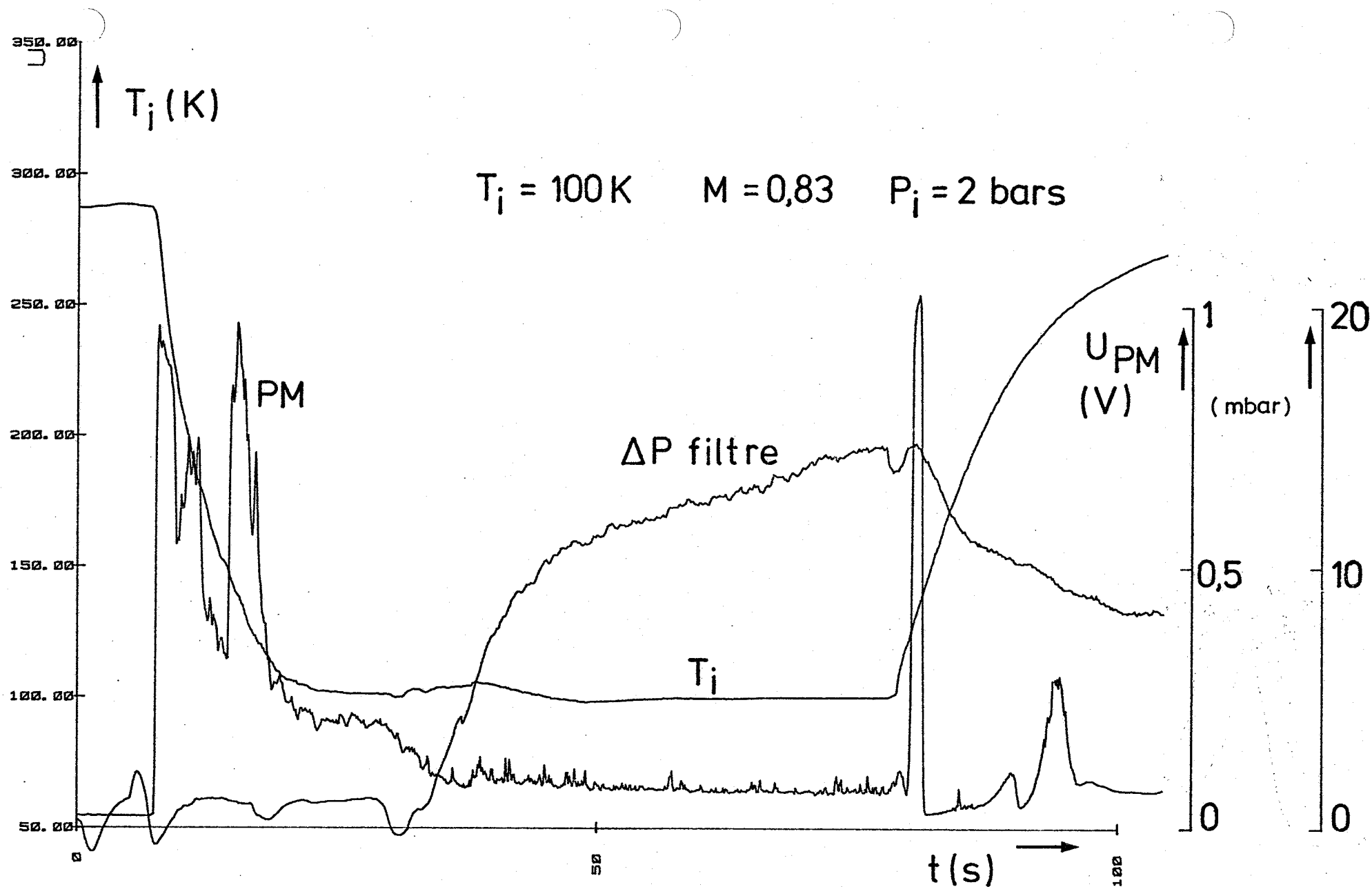
PL. 26 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une rafale cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  et  $T_i = 200 \text{ K}$ .



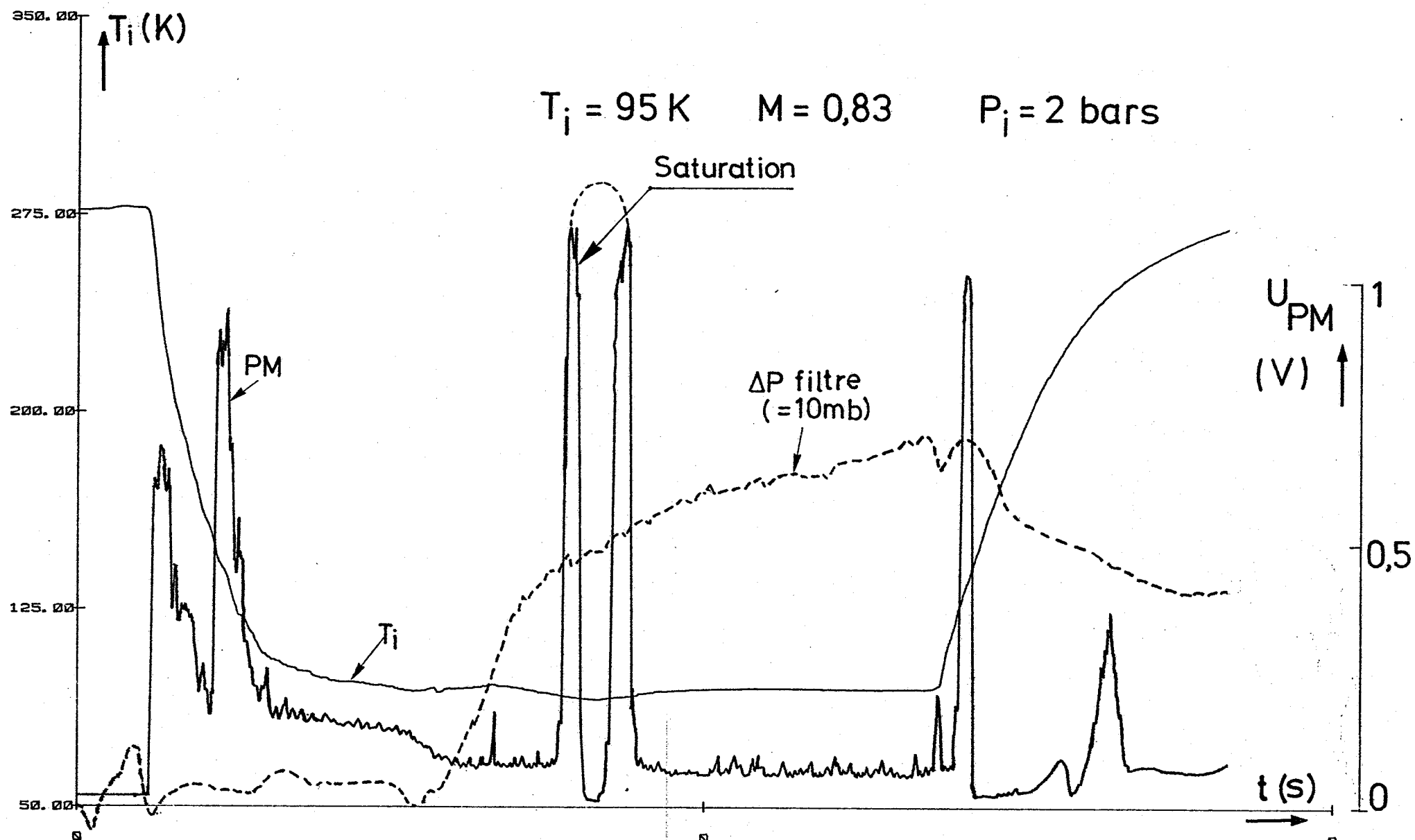
PL. 27 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une rafale cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2\text{ bars}$  et  $T_i = 150\text{ K}$ .



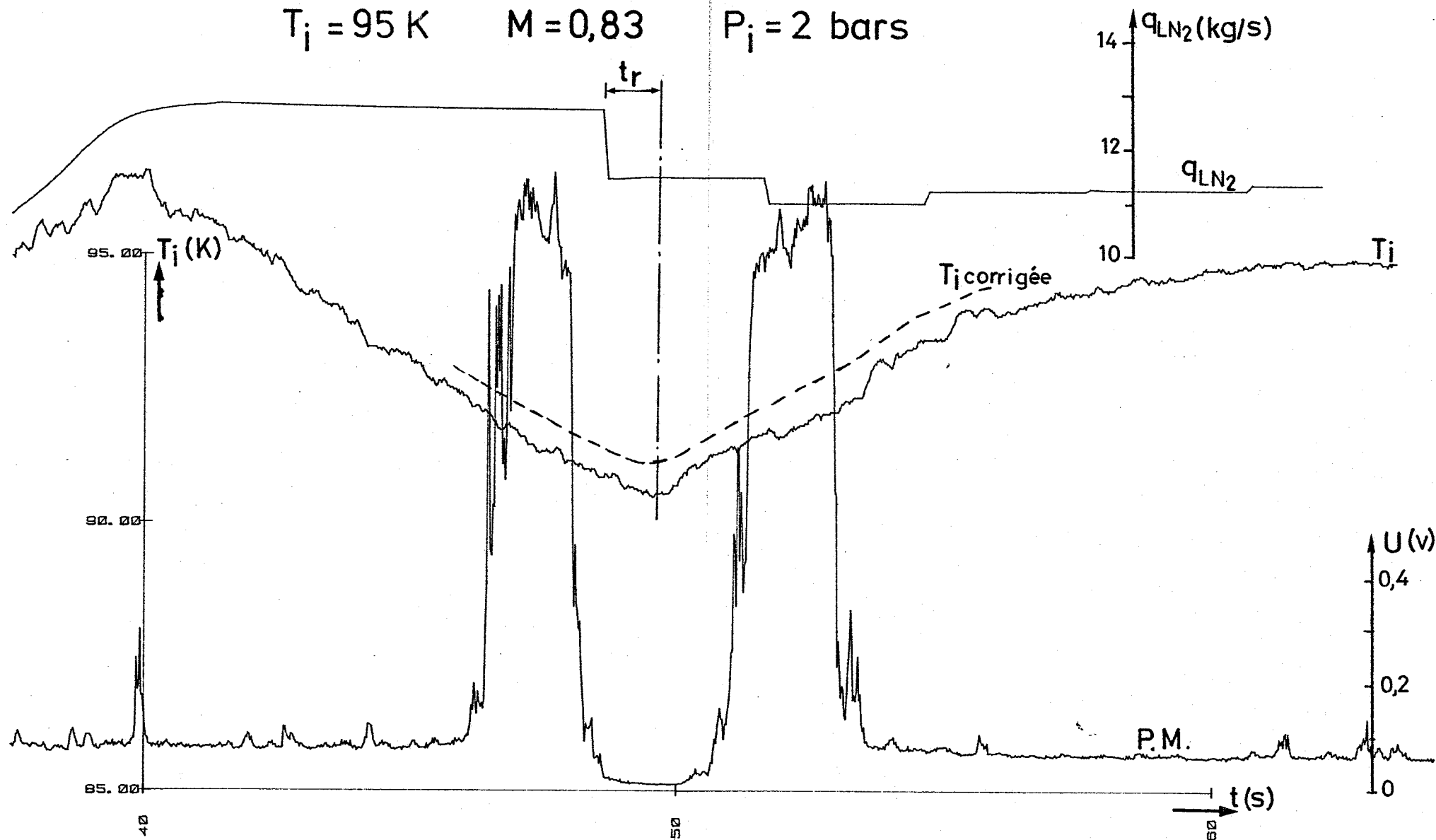
PL. 28 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une ralale cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  et  $T_i = 120 \text{ K}$ .



PL. 29 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une rafale cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  et  $T_i = 100 \text{ K}$ .

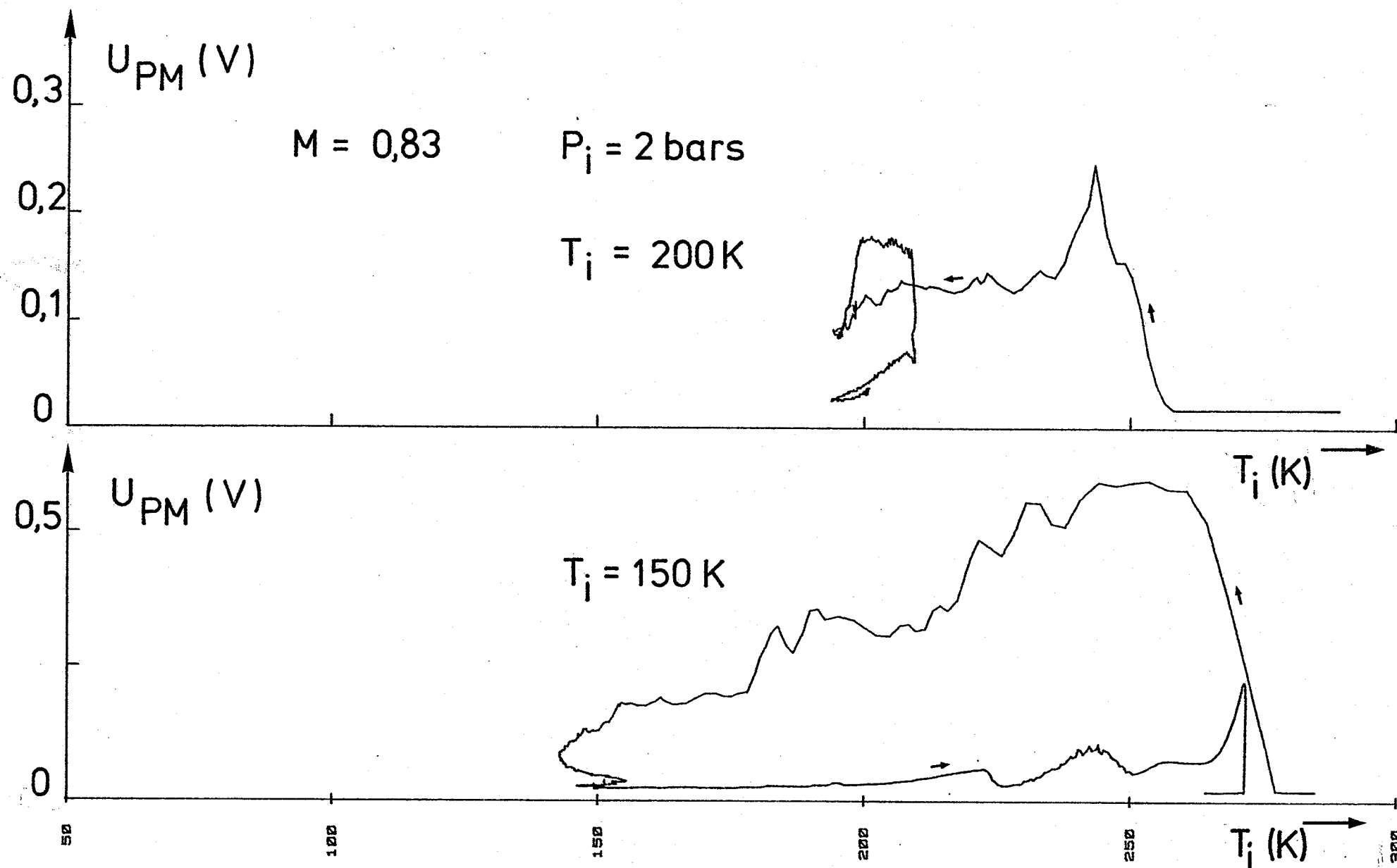


PL. 30 : Evolution en fonction du temps de la température génératrice de l'écoulement, de la perte de charge du filtre anti-poussière de la chambre et du signal du photomultiplicateur au cours d'une rampe cryogénique à  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$  et  $T_i = 95 \text{ K}$ .



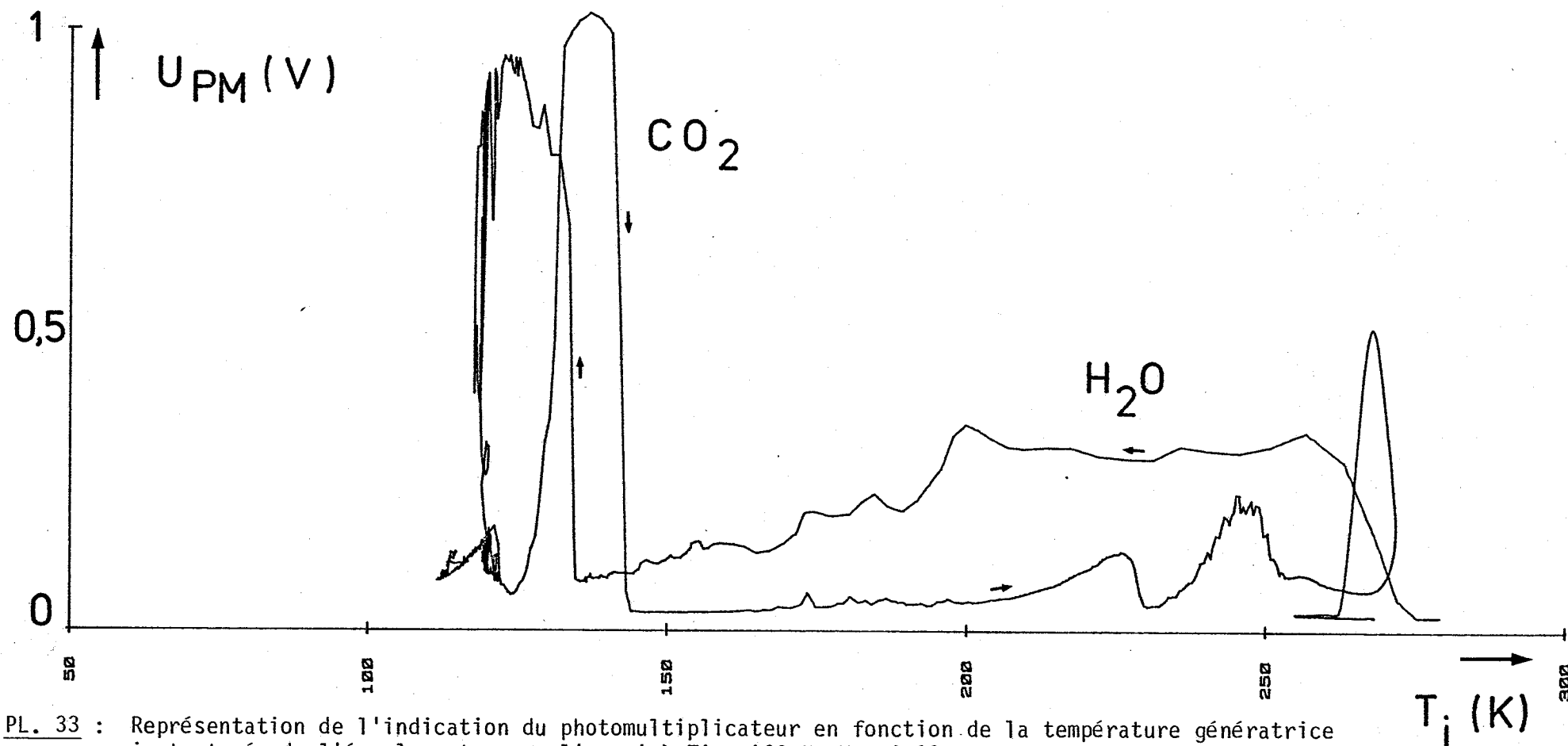
PL. 31 : Représentation à grande échelle de l'évolution de la température génératrice de l'écoulement et du débit d'azote liquide injecté, pendant la détection d'un passage très important de particules, à basse température, au cours de l'essai à  $T_i = 95 \text{ K}$ ,  $M = 0,83$ ,  $P_i = 2 \text{ bars}$ .



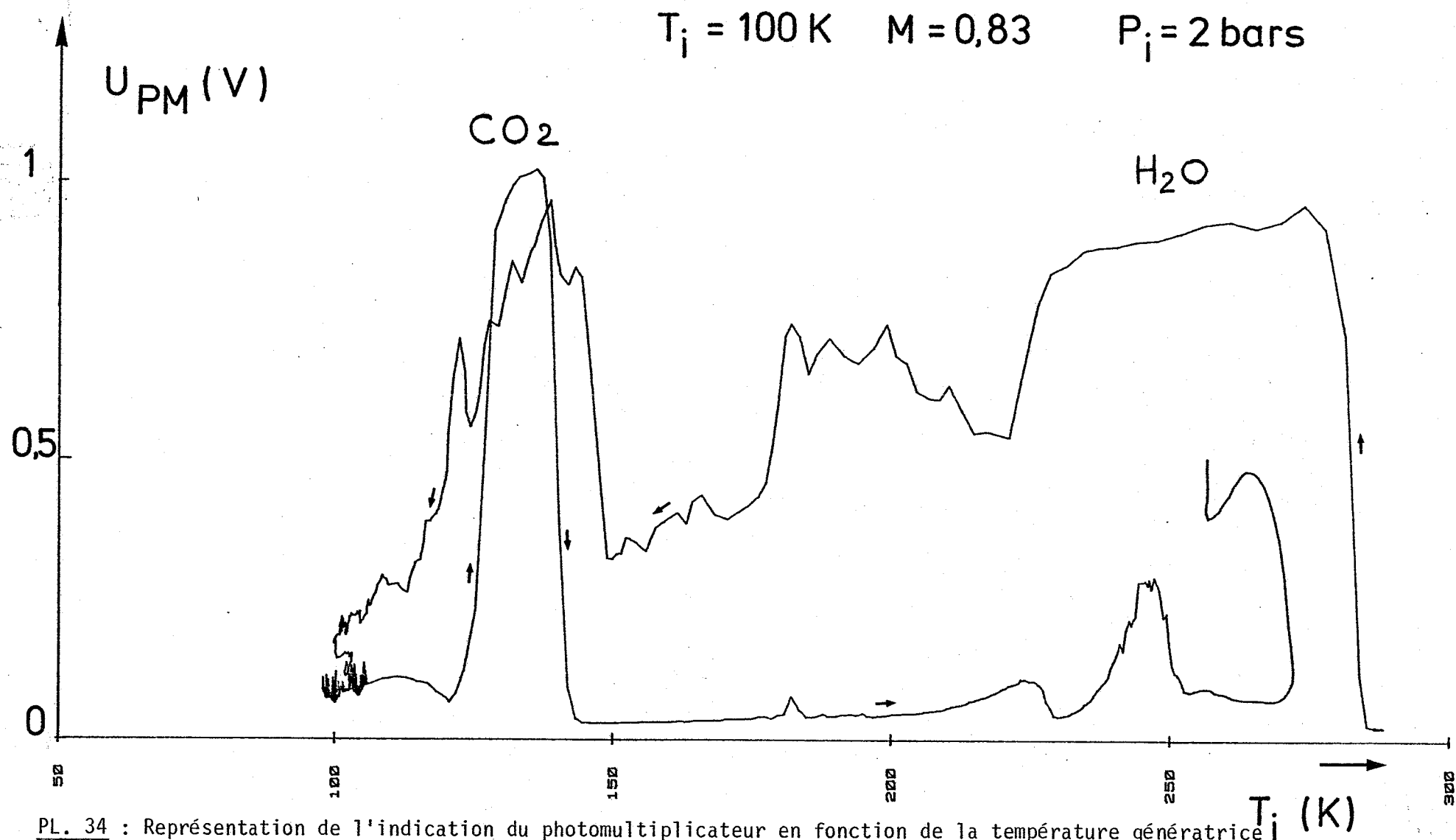


PL. 32 : Représentation de l'indication du photomultiplicateur en fonction de la température génératrice instantanée de l'écoulement, pour les essais à  $T_i = 200 \text{ K}$  et  $T_i = 150 \text{ K}$ , à  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ .

$T_i = 120 \text{ K}$      $M = 0,83$      $P_i = 2 \text{ bars}$

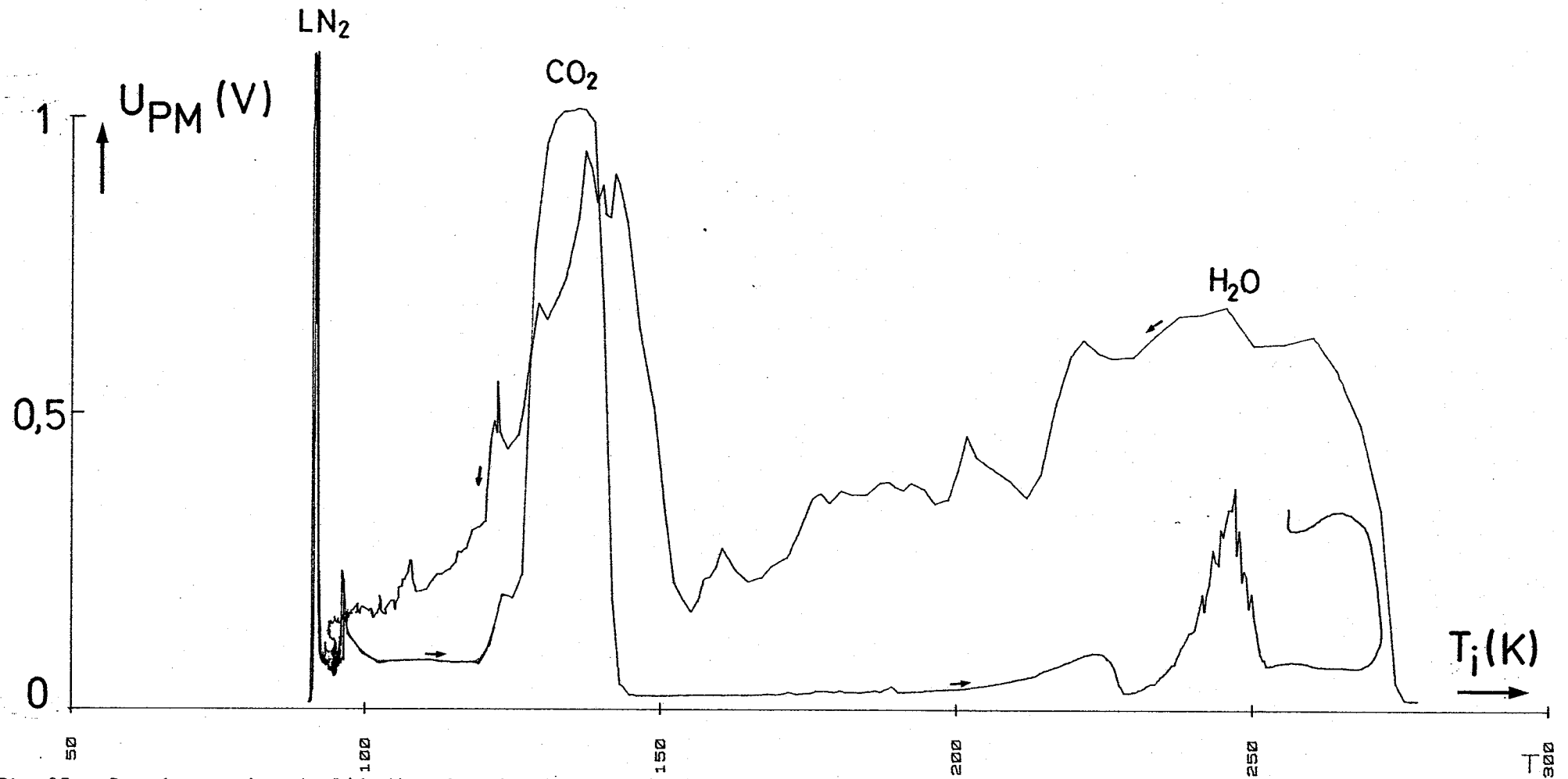


PL. 33 : Représentation de l'indication du photomultiplicateur en fonction de la température génératrice instantanée de l'écoulement, pour l'essai à  $T_i = 120 \text{ K}$ ,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ .



PL. 34 : Représentation de l'indication du photomultiplicateur en fonction de la température génératrice  $T_i$  instantanée de l'écoulement, pour l'essai à  $T_i = 100 \text{ K}$ ,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ .

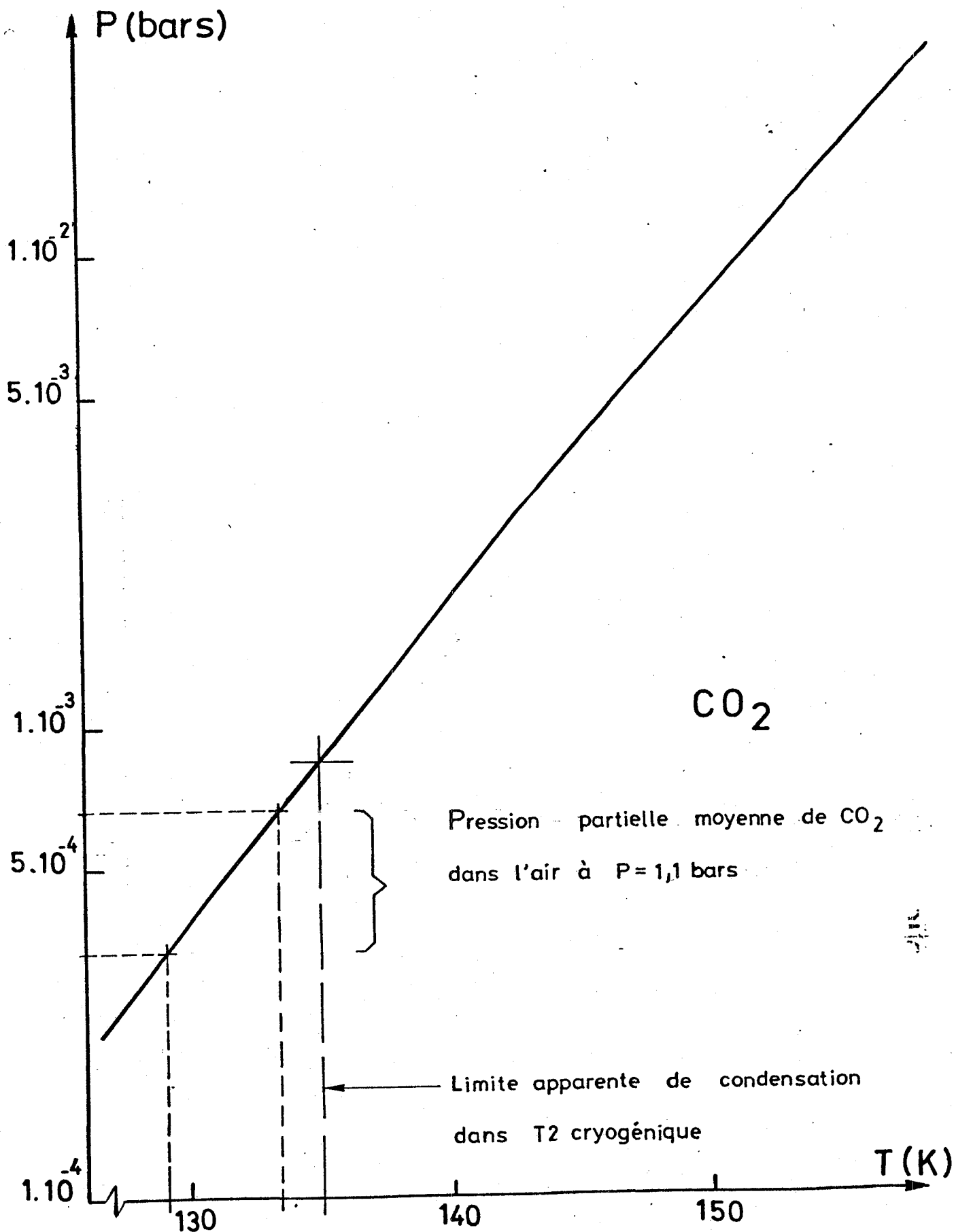
$T_i = 95 \text{ K}$     $M = 0,83$     $P_i = 2 \text{ bars}$



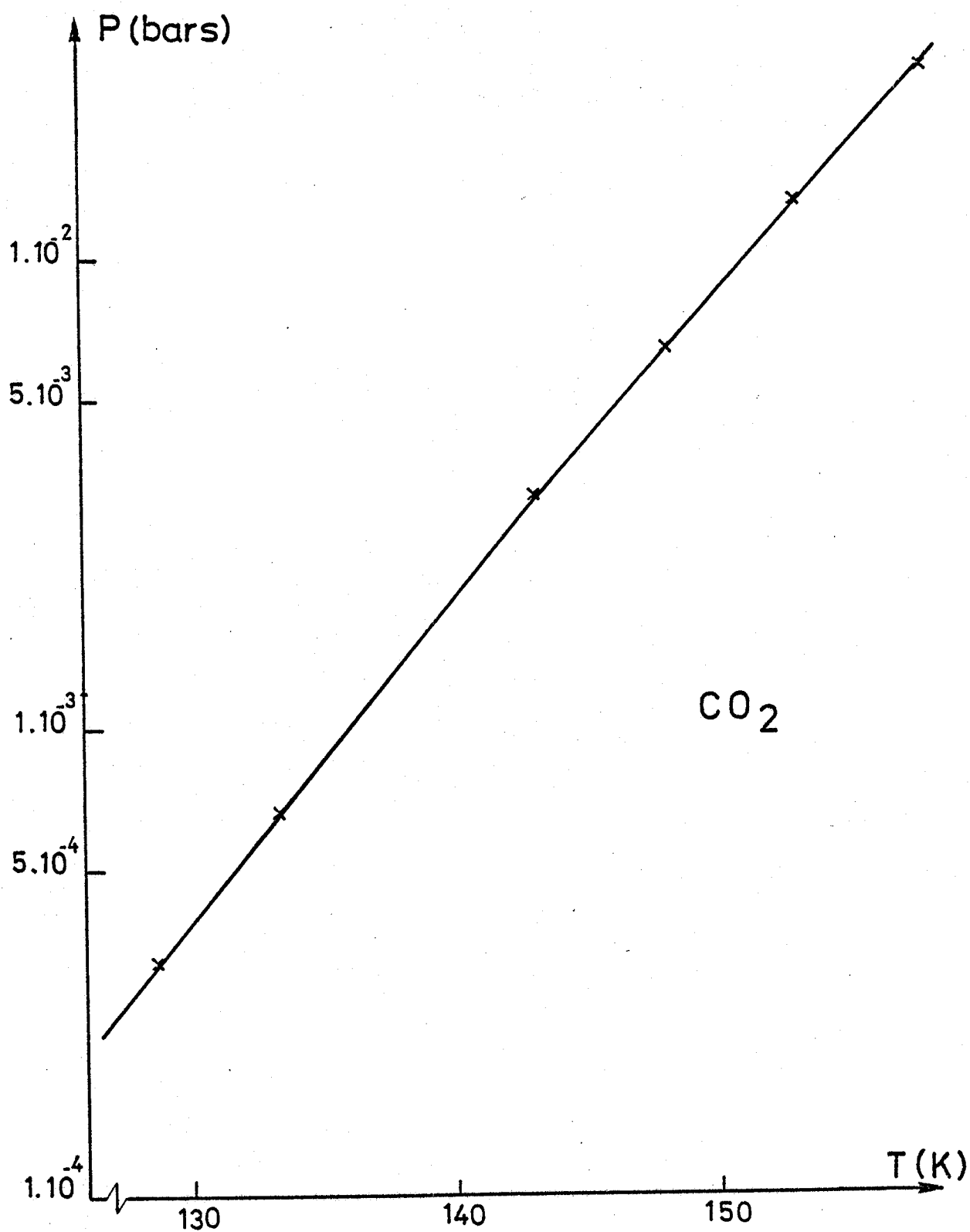
PL. 35 : Représentation de l'indication du photomultiplicateur en fonction de la température génératrice instantanée de l'écoulement, pour l'essai à  $T_i = 95 \text{ K}$ ,  $M = 0,83$  et  $P_i = 2 \text{ bars}$ .

E R R A T U M

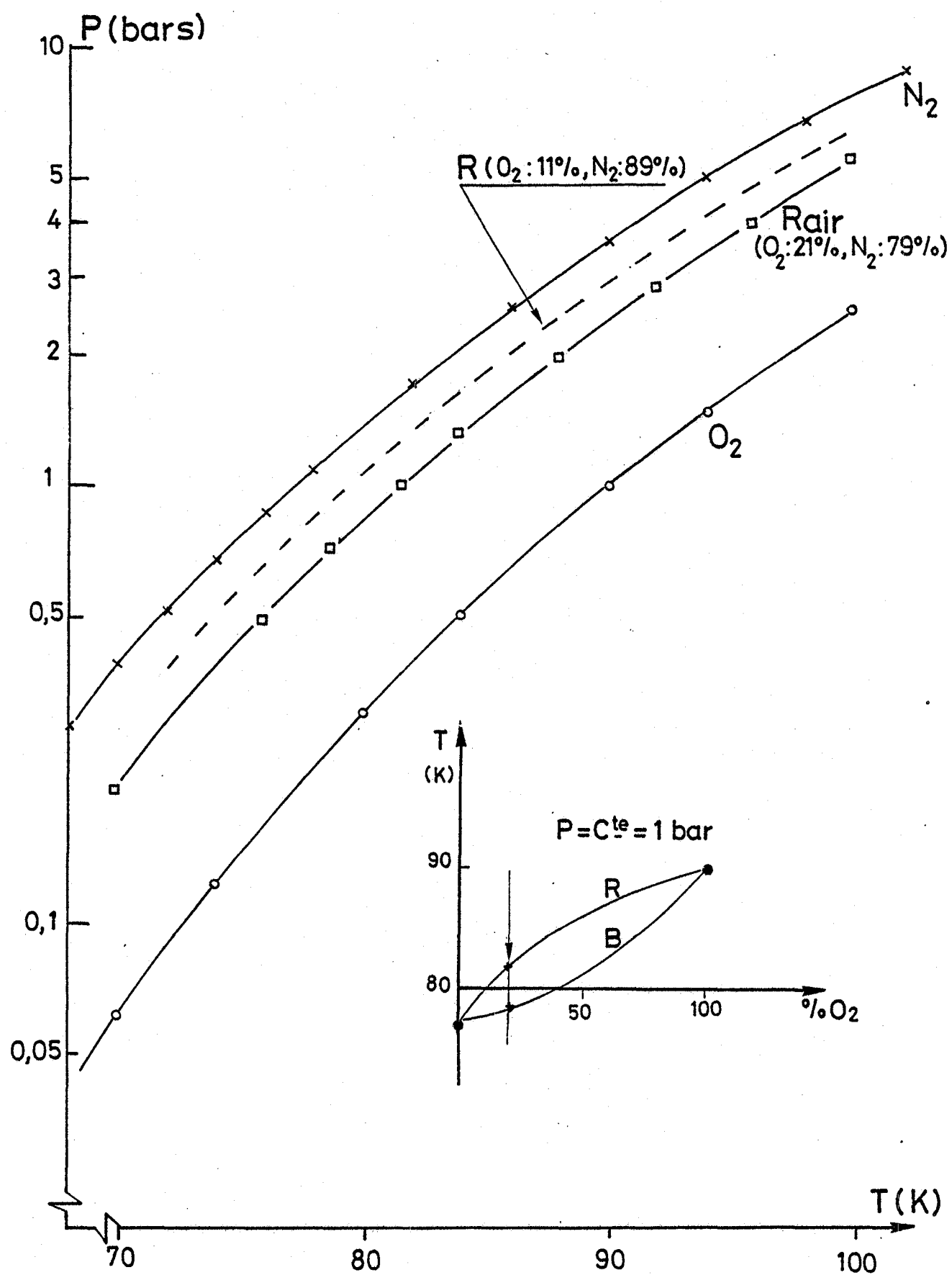
- 1/ Remplacer la planche 36 par la planche donnée ci-après.
- 2/ Les points figurant sur les diagrammes des planches 37, 38 et 39 ne sont pas des points expérimentaux. Ils correspondent aux valeurs exactes de l'équilibre liquide vapeur de l'azote, de l'oxygène ou de l'air. Seul le point noté "point expérimental" à la planche 39 correspond à un phénomène de condensation mis en évidence expérimentalement à la soufflerie T2.



PL. 36 : Courbe d'équilibre vapeur-solide du gaz carbonique, pour des pressions faibles, dans le diagramme (P,T).

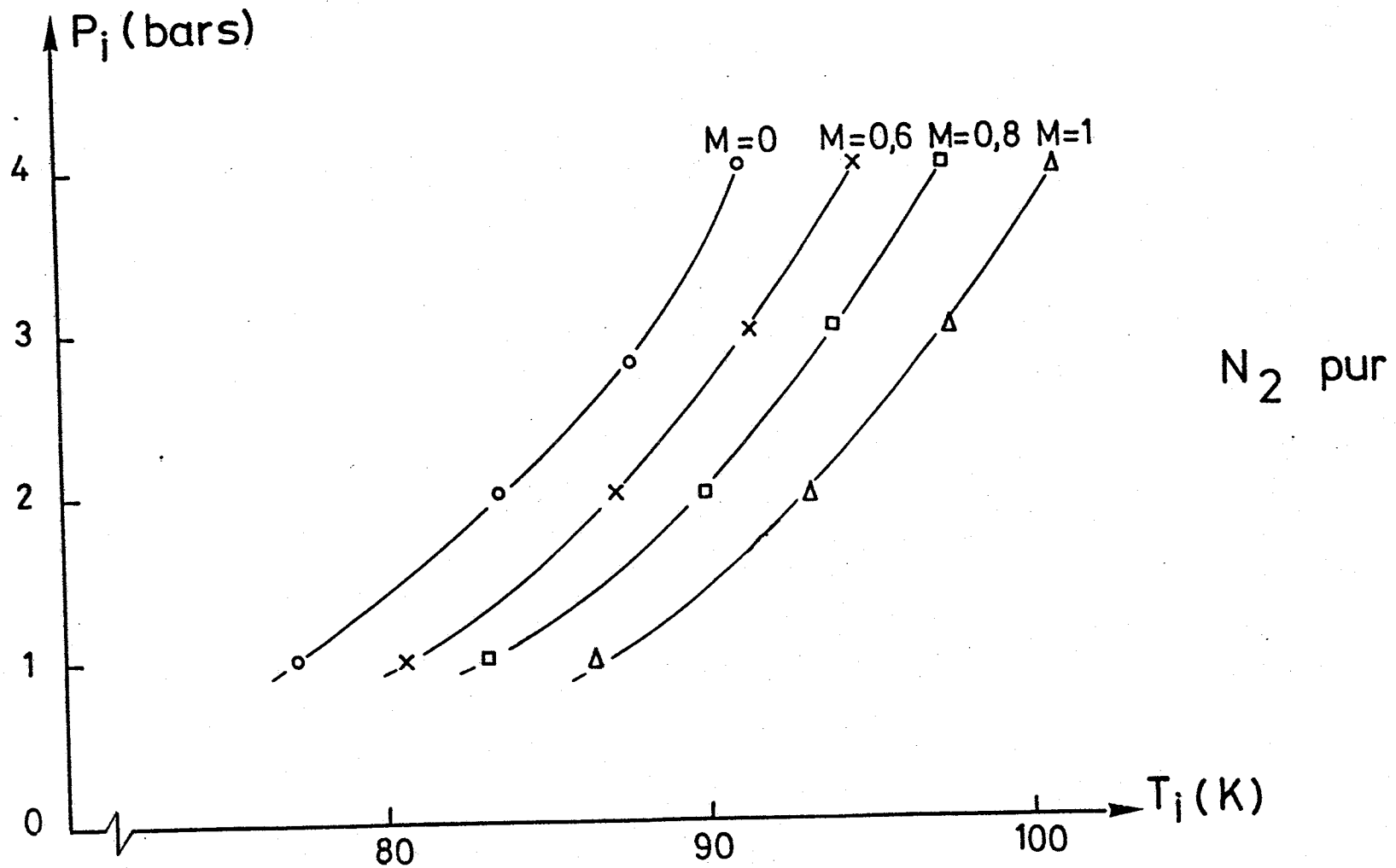


PL. 38 : Courbes de condensation d'un écoulement d'azote pur, dans la veine d'essai, en fonction des paramètres de l'essai : représentation paramétrée suivant  $M$  dans le plan  $(P_i, T_i)$ .

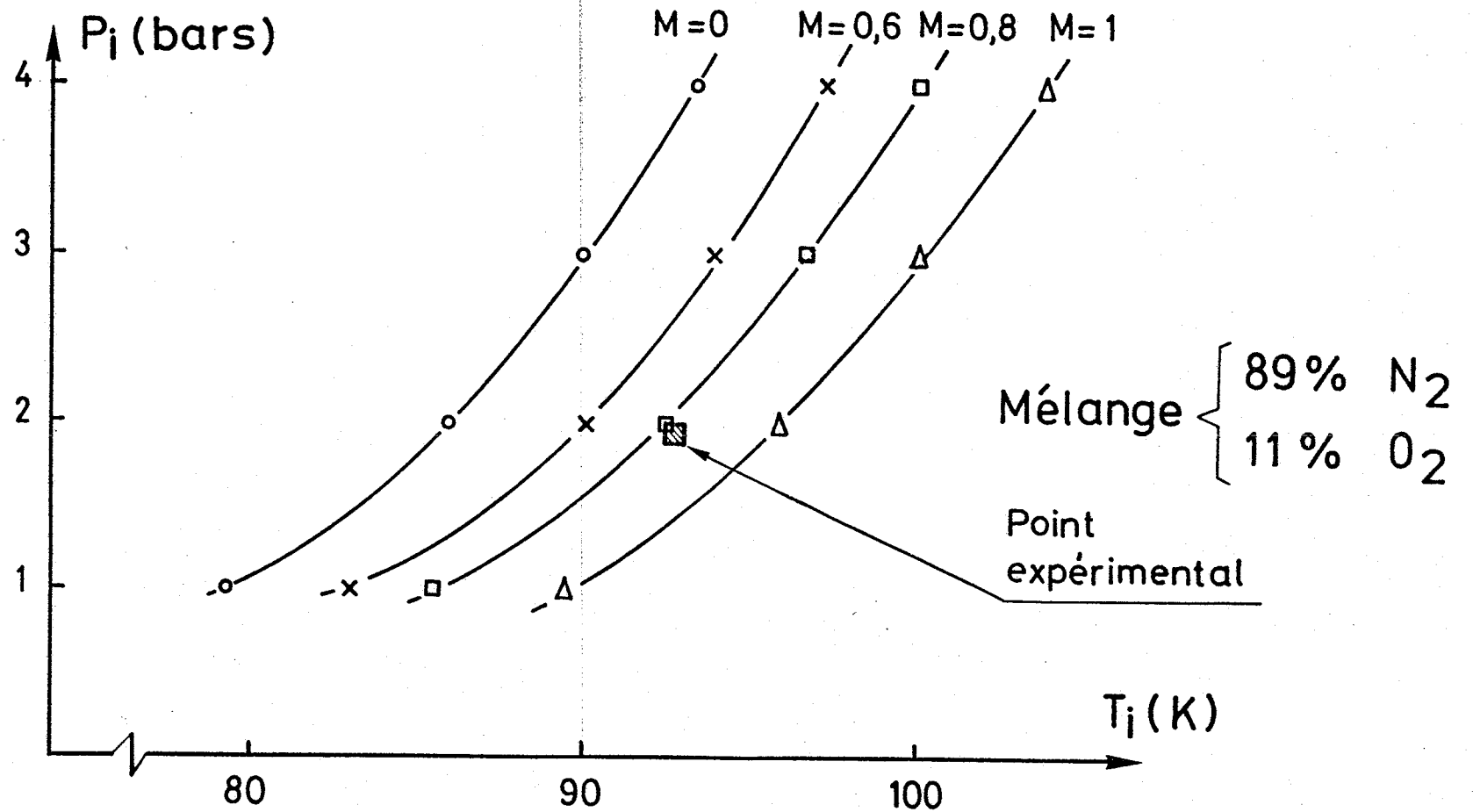


PL. 37 : Courbe de rosée des mélanges Oxygène-Azote dans le diagramme  $(P, T)$ .





PL. 38 : Courbes de condensation d'un écoulement d'azote pur, dans la veine d'essai, en fonction des paramètres de l'essai : représentation paramétrée suivant  $M$  dans le plan  $(P_i, T_i)$ .



PL. 39 : Courbes de rosée du mélange Air-Azote (89 %  $N_2$  - 11 %  $O_2$ ) dans la veine d'essai, en fonction des paramètres de l'écoulement ( $M$ ,  $P_i$ ,  $T_i$ ).

LANGLEY RESEARCH CENTER



3 1176 00520 2115